

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем**

**Кафедра Телекомунікаційних систем**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.О. Уривський

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**з напряму підготовки 6.050903 Телекомунікації  
(172 Телекомунікації та радіотехніка)**

**на тему: «Розрахунок параметрів оптичного фільтру для волоконно-  
оптичних мереж»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ТС-51

Квітка Алла Станіславівна \_\_\_\_\_

Керівник:

професор кафедри телекомунікацій

Трубін О.О. \_\_\_\_\_

Рецензент:

д.т.н, доцент

Шелковніков Б.М. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інститут телекомунікаційних систем**  
**Кафедра Телекомунікаційних систем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки– 6.050903 «Телекомунікації» (172 Телекомунікації та радіотехніка)

Програма професійного спрямування – «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.О. Уривський

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Квітка Алла Станіславівна**

1. Тема роботи **«Розрахунок параметрів оптичного фільтру для волоконно-оптичних мереж»**, керівник роботи Трубін Олексій Олександрович, професор кафедри Телекомунікацій, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи

1. Формули для розрахункових параметрів розсіювання оптичного фільтру на одному мікрорезонаторі.
2. Провести аналіз коефіцієнтів зв'язку мікрорезонаторів з лінією передачі для різних типів фільтрів.
3. Здійснити вибір найліпшого фільтру для систем оптичного зв'язку.

4. Зміст роботи

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

1. Плакат «Розрахунок параметрів оптичного фільтру для волоконно-оптичних мереж»

- 2.Плакати «Оптичні резонатори з модами шепочучої галереї»
- 3.Плакати «ADF фільтр на базі оптичних мікрорезонаторів»
- 4.Плакати «Моделювання однорезонаторного оптичного ADF фільтра»
- 5.Плакати «Мультиплексор на базі оптичного мікрорезонатора»
- 6.Плакати «Висновки»

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз наукових публікацій щодо оптичних фільтрів.		
2	Розрахунок матриці розсіювання одно-резонаторного оптичного фільтру.		
3	Проведення чисельних розрахунків фільтрів на різних видах оптичних мікрорезонаторів.		
4	Порівняння результатів розрахунків з даними наукових публікацій.		
5	Аналіз результатів та висновки.		
6	Написання роботи.		

Студентка

/Квітка А. С./

Керівник роботи

/Трубін О. О./

## РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 61 с., 35 рис., 1 таблиця, 2 лістинги, 22 джерела.

Метою роботи є розгляд альтернативного та універсального методу розрахунку коефіцієнтів передачі Add/Drop фільтра на основі оптичного мікрорезонатора. Цей метод базується на спрощених рівняннях збурень Максвелла.

Його можна застосовувати до будь-якої форми оптичного резонатора, будь то циліндричний, сферичний, кільцевий та т.д., і це дозволить набагато швидше отримати необхідні параметри резонаторів і пристроїв, які на них побудовані.

У цій роботі змодельований однорезонаторний фільтр, основою якого був Х-подібний кільцевий мікрорезонатор. Використовуючи вибірку коефіцієнтів зв'язку, вдалося отримати залежності, які добре узгоджуються з аналогічними дослідженнями.

З цього можна зробити висновок, що запропонована модель розрахунку є коректною і може бути використана не тільки для розрахунку параметрів резонаторів, але і для отримання параметрів різноманітних структур побудованих на них, таких як фільтри, мультиплексори та демультимплексори.

ОПТИЧНИЙ МІКРОРЕЗОНАТОР, МОДИ ШЕПОПУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ, ADF ФІЛЬТР, ADF МУЛЬТИПЛЕКСОР, КІЛЬЦЕВИЙ МІКРОРЕЗОНАТОР, СФЕРИЧНИЙ МІКРОРЕЗОНАТОР, OADF, BOTTLE МІКРОРЕЗОНАТОР, ДОБРОТНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ПЕРЕДАЧІ

## ABSTRACT

The purpose of the work is review of alternative and universal method for calculating the transmission coefficients of an Add / Drop filter based on an optical micro-resonator. This method is based on Maxwell's simplified perturbation equations.

It is applicable to any form of optical resonator, be it cylindrical, spherical, ring, etc., and will allow much faster to obtain the necessary parameters of the resonator and devices that are built on it.

In this work, a single-resonator filter was modeled, the basis of which was an X-shaped ring micro-resonator. Using a selection of coupling coefficients, we managed to obtain dependencies that were in good agreement with similar studies.

From this it can be concluded that the proposed calculation model is correct and can be used not only to calculate the resonator, but also for the structures that are built on it, such as filters, multiplexers and demultiplexers.

OPTICAL MICRORESONATOR, WHISPERING GALLERY MODES, ADF FILTER, ADF MULTIPLEXER, RING MICRORESONATOR, SPHERICAL MICRORESONATOR, OADF, BOTTLE MICRORESONATOR, QUALITY FACTOR, COUPLING COEFFICIENT

## ЗМІСТ

1. ЗАГАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ОПТИЧНИХ МІКРОРЕЗОНАТОРІВ .....	12
1.1 Добротність мікрорезонаторів .....	14
1.2 Види мікрорезонаторів.....	16
1.2.1 Сферичні мікрорезонатори МШГ .....	16
1.2.2 Оптичний Bottle мікрорезонатор МШГ .....	20
1.2.3 Кільцевий мікрорезонатор з МШГ .....	23
1.3 Висновки з розділу 1 .....	29
2.1 Add/Drop фільтр на основі оптичних кільцевих резонаторів .....	31
2.1.1 Принцип роботи .....	31
2.1.2 Вимоги до ADF.....	34
2.2 ADF- фільтр на базі квадратного/квазі-квадратного фотонно-кристалічного резонатора .....	34
2.3 ADF- фільтр на базі кільцевого фотонно-кристалічного резонатора з подвійним вигином.....	38
2.4 ADF- фільтр на базі кільцевого х-подібного фотонно-кристалічного резонатора.....	39
2.5 ADF- фільтр на базі Bottle мікрорезонатора.....	40
3. РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОРЕЗОНАТОРНОГО ОПТИЧНОГО ФІЛЬТРА.....	45
3.1 Проектування однорезонаторного фільтру.....	45
3.2 Дослідження характеристик розсіювання фільтра.....	47

					НТУУ1068-с.05.ТС-51.2019.ПЗ						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розрахунок параметрів оптичного фільтру для волоконно-оптичних мереж			Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.	Квітка А.С.										
Перев.	Трубін О.О.									6	61
Реценз.	Шелковніков Б.М							ІТС			
Н. Контр.	Новіков В.І.										
Затверд.	Уривський Л.О.										

3.3 Висновки з розділу 3 .....	48
4. ОПТИЧНІ МУЛЬТИПЛЕКСОРИ НА ОСНОВІ ADD/DROP ФІЛЬТРІВ (OADM).....	49
4.1 Схематичне функціональне представлення OADM.....	50
4.2 Типи OADM .....	51
4.2.1 FOADM .....	51
4.2.2 ROADM .....	52
4.3 OADM на основі кільцевого резонатора .....	53
4.3.1 Восьми-канальний ROADM на основі кільцевого резонатора.....	54
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ADF	Add/Drop filter- Add/Drop фільтр
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing - Щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі
FOADM	Fixed Optical Add-Drop Multiplexer - Оптичний Add-Drop мультиплексор, який не піддається переналаштуванню
FSR	Free spectral range – Вільний спектральний діапазон
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer - Оптичний Add/Drop мультиплексор
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer – Оптичний Add-Drop мультиплексор, який можна перелаштовувати
WGM	Whispery Gallery Mode - Моді шепочучої галереї
MP	Мікрорезонатор
МШГ	Моди шепочучої галереї
OMP	Оптичний мікрорезонатор



## ВСТУП

Активний розвиток мікроелектроніки та волоконної оптики стимулює розробку і дослідження малогабаритних оптичних приладів, які дозволяють збільшити швидкодію та, навпаки, зменшити енергоспоживання досить великої гами систем.

Для цього необхідним є пошук і аналіз високодобротних резонансних контурів, завдяки яким відкриваються додаткові можливості розвитку телекомунікаційних структур та бази сучасної оптичної електроніки в цілому. Одним з найбільш перспективних компонентів фотоніки є оптичний мікрорезонатор з модами шепочучої галереї (МШГ) [1].

Термін «хвилі шепочучої галереї» був вперше використаний лордом Релеєм в 19 столітті для опису феномена шепочучої галереї, розташованій під куполом собору Святого Павла в Лондоні (рис.1).

Було відомо, що звук (шепіт), що відтворюється на одному кінці купола, все ще можна було почути голосно на протилежному кінці купола, на великій відстані від джерела [2].

У той час як у вільному просторі інтенсивність звуку зменшується обернено пропорційно квадрату відстані від джерела, у шепочучій галереї всередині вузького шару інтенсивність звуку зменшується лише прямо пропорційно відстані від джерела, тобто значно повільніше, аніж у вільному просторі, і тому звук почути голосно навіть на великій відстані. Лорд Релей назвав ці звукові хвилі хвилями шепочучої галереї [2].

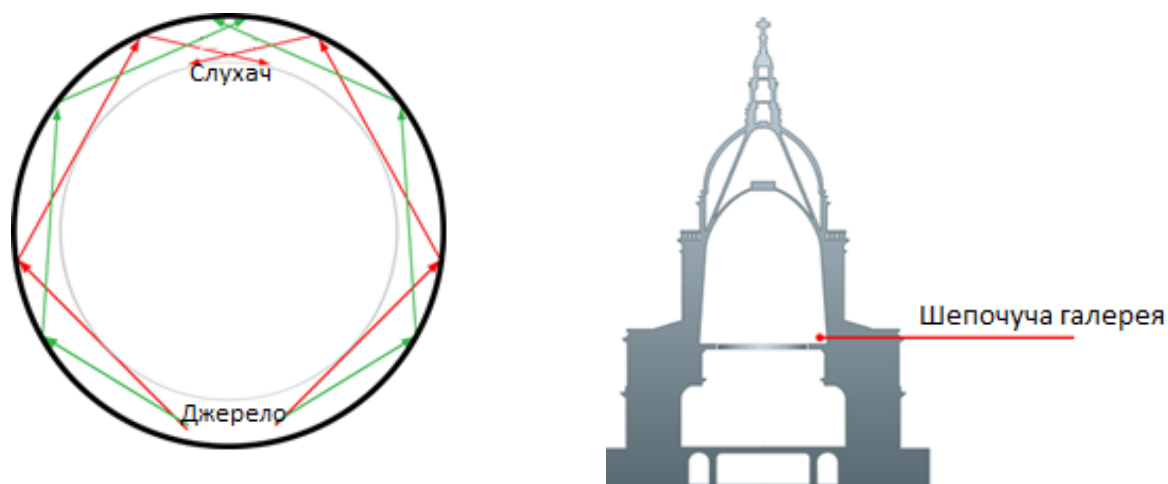


Рисунок 1 Модель розповсюдження хвиль під куполом собору Святого Павла в Лондоні

Оптичні мікрорезонатори (ОМР) виявилися незамінними як для фундаментальних дослідів, так і для широкого спектру приладів, таких як: фільтри, мультиплексори, демультимплексори, оптичні лінії затримки, сенсори і мініатюрні датчики.

Вони можуть підтримувати резонанси з високою добротністю на основі ефективного збудження мод шепочучої галереї і мають потенціал для реалізації ряду компактних, високошвидкісних приладів наступного покоління [3].

Для поліпшення параметрів розсіювання в деяких випадках необхідно будувати такі прилади на мікрорезонаторах різної форми, виготовлених з різних діелектриків (рис.2). Однак в цьому випадку теорія, що описує процеси розсіювання, значно ускладнюється [4].

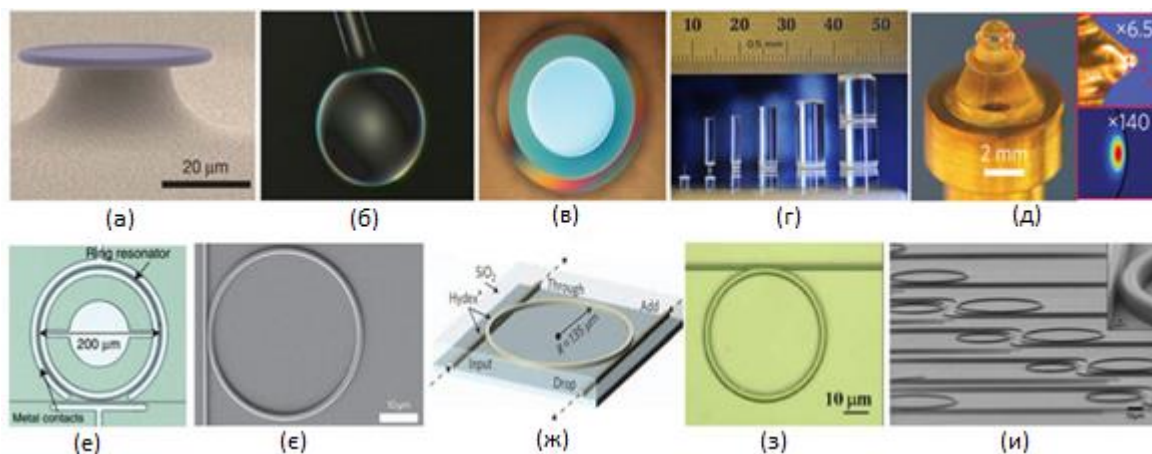


Рисунок 2 Діелектричні мікрорезонаторні платформи: (а) тороїд кремнію; (б) сфера кремнезему; (в) клиновий диск із силікатом; (г) кремнієвий стрижень; (д) тороїд фторидів магнію; (е) кремнієвий резонанс мікро-кільця; (є) мікро-кільцевий резонатор з нітридом кремнію; (ж) Hydex-мікро-кільцевий резонатор; (з) мікро-кільцевий резонатор з нітриду алюмінію; (и) алмазний мікроконтактний резонатор [5].

Саме тому виникає задача розробки альтернативного методу розрахунку параметрів розсіювання Add/Drop фільтрів, основою яких є різні за формою та матеріалом мікрорезонатори. Це дозволить спростити процес розрахунку та аналізу МР та дозволить швидше синтезувати прилади на їх основі, відповідно до вимог, які будуть поставлені.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ОПТИЧНИХ МІКРОРЕЗОНАТОРІВ

Оптичні мікрорезонатори з модами шепочучої галереї, в яких локалізація фотонних мод відбувається за рахунок повного внутрішнього відбиття від границь МР, мають великі перспективи використання в нових поколіннях оптоелектронних приладів і системах біологічного детектування.

МР з модами шепочучої галереї характеризуються високою добротністю в широкому діапазоні довжин хвиль і малим ефективним об'ємом локалізації фотонних мод [6].

Серед МР особливе місце займають резонатори з модами шепочучої галереї, які багато в чому подібні хвильовим модам, але суттєвою їх відмінністю є те, що вони формуються в результаті повного внутрішнього відбиття променя тільки від однієї границі розподілу середовищ, а не від двох або чотирьох, як в пласкому хвилеводі. На рис.1.1 пунктиром зображено розповсюдження променів, які відповідають модам шепочучої галереї, в резонаторах круглої (а) і багатокутної (б) форми.

Розповсюдження променів аналогічне розповсюдженню звукових хвиль у круглій “Шепочучій Галереї” Собору Святого Павла у Лондоні.

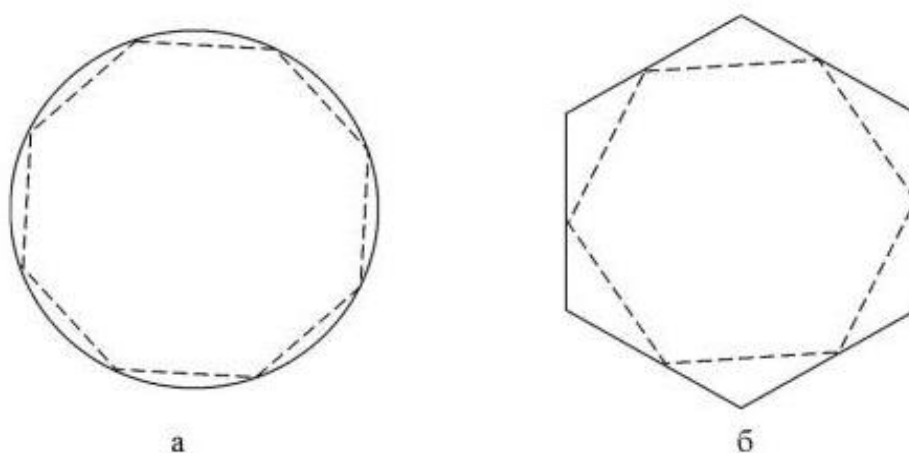


Рисунок 1.1 Розповсюдження променів при збудженні моди шепочучої галереї в резонаторі круглої форми (а) та, який має форму багатокутника (б) [6]

Резонатори шепочучої галереї виготовляють у формі сфери, циліндра, диска, багатокутника, пляшки, кільця і т.д. На рис.1.2 зображений розподіл інтенсивності моди з  $N=1$  в дисковому резонаторі, який має радіус  $r_0$ . З рисунку видно, що енергія електромагнітної хвилі зосереджена поблизу границі розподілу середовищ.

Перевагою резонаторів з МШГ є їх надзвичайно висока добротність  $Q$ , так як вона перевищує на кілька порядків добротність інших типів оптичних резонаторів. Сферичний мікрорезонатор з МШГ теоретично може мати добротність  $10^{11}$ . Реально в сферичних резонаторах досягнута добротність  $5 \cdot 10^9$ . Добротність циліндричних і дискових резонаторів може складати  $10^7 \dots 10^8$ . Це дозволяє створювати на основі резонаторів з модами шепочучої галереї фільтри з дуже вузькою спектральною полосою (рис.1.3), а також мікролазери з вузьким спектром генерації [6].

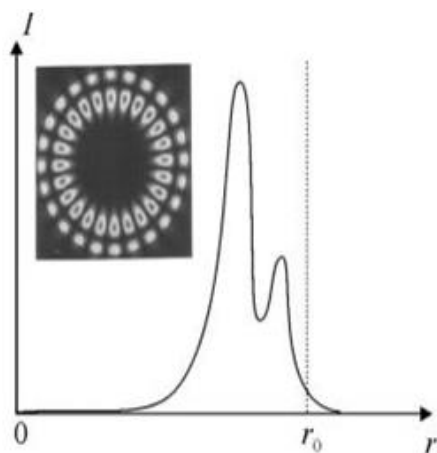


Рисунок 1.2 Радіальний розподіл інтенсивності моди шепочучої галереї [6]

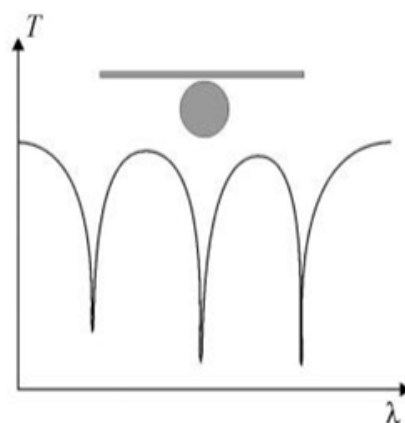


Рисунок 1.3 Спектр пропускання хвилеводу, який має електромагнітний зв'язок з дисковим резонатором [6]

Спектральне положення резонансу в резонаторах з модами шепочучої галереї сильно залежить від показників заломлення самого резонатора і

оточуючого середовища. Завдяки цьому, в основі таких резонаторів можуть бути створенні надзвичайно чуттєві хвилеводні датчики і сенсори.

В інтегральній оптиці використовуються, в основному, дискові мікрорезонатори з модами шепочучої галереї, так як вони легко можуть бути виготовленні методом фотолітографії [6].

### 1.1 Добротність мікрорезонаторів

Оптичні резонатори, які виготовляються з різних діелектричних матеріалів, в першу чергу відрізняються від інших резонаторів гігантською добротністю. При цьому такі резонатори мають невеликий об'єм моди і високу інтенсивність поля всередині резонатора.

Моди шепочучої галереї представляють собою біжучу хвилю, яка поширюється всередині мікрорезонатора, з повним внутрішнім відбиттям від кордону розділу середовищ в кільцевій екваторіальній області. Усередині оптичного резонатора світло інтерферує само з собою, в результаті чого тільки обмежений набір мод може існувати без істотних втрат. Умова виникнення резонансу в загальному випадку описується співвідношенням [7].

$$2\pi n_{eff}a = n_w\lambda, \quad (1.1)$$

де  $n_{eff}$  – ефективний показник заломлення матеріалу, з якого виготовлений мікрорезонатор;  $a$  – екваторіальний радіус мікрорезонатора;  $n_w$  – число довжин хвиль, які вкладаються вздовж периметра мікрорезонатора;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання.

Добротність є мірою здатності резонатора циркулювати і зберігати світло і зазвичай визначається як відношення накопиченої енергії до енергії, що розсіюється в мікрорезонаторі.

У практичних застосуваннях висока добротність (Q) моди мікрорезонатора призводить до вузької резонансної ширині лінії, тривалого часу загасання і високою оптичною інтенсивності.

Добротність оптичних мікрорезонаторів визначається різними каналами втрати енергії, а так як втрати складаються, повна добротність описується наступним співвідношенням:

$$\frac{1}{Q_{\Sigma}} = \frac{1}{Q_{\text{вип}}} + \frac{1}{Q_{\text{вн}}} + \frac{1}{Q_{\text{пов}}} + \frac{1}{Q_{\text{от}}} + \frac{1}{Q_{\text{зв}}}, \quad (1.2)$$

тут

$$Q_{\Sigma} = w \frac{\text{енергія, запасена в резонаторі}}{\text{потужність втрат}}, \quad (1.3)$$

де  $w$  – частота;  $Q_{\text{вип}}$  – описує випромінюванні втрати, які обумовлені внутрішнім відбиттям від поверхні кривизни;  $Q_{\text{вн}}$  – описує затухання поля всередині резонатора (розсіювання, поглинання);  $Q_{\text{пов}}$  – описує втрати на поверхні резонатора;  $Q_{\text{от}}$  – описує втрати в навколишньому середовищі;  $Q_{\text{зв}}$  – описує відхід енергії в елемент зв'язку [8].

Випромінювальна добротність для реальних мікрорезонаторів на основі мод шепочучої галереї експоненційно зростає з ростом відношення радіусу резонатора до довжини хвилі і тому не перешкоджає досягненню як завгодно великих значень добротності.

Це означає, що для мікрорезонаторів діаметром більше, приблизно, десяти мікрометрів випромінюванні втрати малі, в порівнянні з іншими видами втрат і ними можна знехтувати. Якщо ж для якихось завдань потрібна мінімізація розмірів резонатора, то цей вид втрат теж треба брати до уваги, добротність деяких видів резонаторів наведена на табл.1.1.

Таблиця 1.1 Добротності мікрорезонаторів

Тип мікрорезонатора	Добротність
Сферичний	$10^6$ - $10^9$
Кільцевий	$10^4$ - $10^9$
Bottle	$>10^8$

## 1.2 Види мікрорезонаторів

Сьогодні існує багато резонаторів, які можуть підтримувати режим ШГ, але у цій роботі нас цікавитимуть резонатори, які також підтримують оптичні частотні режими електромагнітного поля. Геометрія і матеріал оптичних резонаторів з модами шепочучої галереї впливають на їх характеристики, в тому числі і на просторове розподілення моди, ефективність зв'язку, добротність і, як результат, чутливість до дії зовнішнього середовища. Тому для класифікації слід розділити їх по групах з різними параметрами:

- 1) За формою оптичних діелектричних мікрорезонаторів (сферичні, дискові, кільцеві і т. д.)
- 2) За матеріалом оптичних діелектричних мікрорезонаторів (кристалічні, з фотонним кристалом, із плавленого кварцу і т. д.)
- 3) Методу отримання оптичних діелектричних мікрорезонаторів (механічний, термічний, метод літографії)

### 1.2.1 Сферичні мікрорезонатори МШГ

Моди шепочучої галереї на сферичній поверхні були вперше описані у працях лорда Релея ще на початку минулого століття, але тільки після того як винайшли лазер вони почали здобувати певну наукову популярність і лише протягом останніх двох десятиліть знайшли практичне застосування в інтегральній та оптичній техніці.

Одним з найпростіших резонаторів, що підтримують моди шепочучої галереї, є діелектрична сфера з показником заломлення вище, ніж навколишній матеріал.



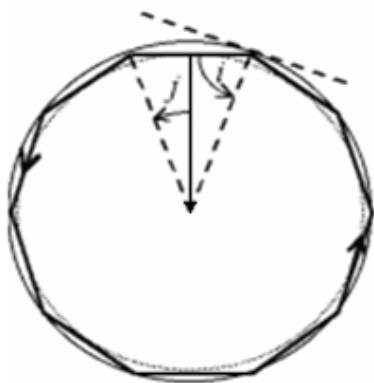


Рисунок 1.4 Промінь поширення світла за допомогою сумарного внутрішнього відбиття [9]

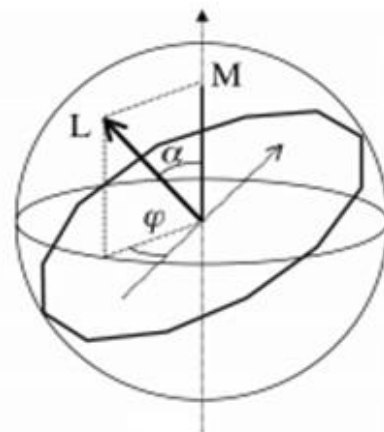


Рисунок 1.5 Кутовий імпульс  $L$ , пов'язаний з WGM і його проекцією  $M$  на полярну вісь [9]

Розглянемо мікросферу радіуса  $a$  з показником заломлення  $n_{eff}$  і промінь світла, що поширюється всередині, потрапляючи на поверхню під кутом падіння  $i$  (Рис.1.4). Якщо  $i > i_c = \arcsin(1/n_{eff})$ , тоді відбувається повне внутрішнє відбиття.

Через сферичну симетрію всі наступні кути падіння однакові, і промінь захоплений. Ця проста геометрична картина призводить до поняття резонансів. Для великих мікросфер ( $a \gg \lambda$ ), захоплений промінь поширюється близько до поверхні і проходить через відстань  $\approx 2\pi a$  в обидва кінці.

Якщо один оберт хвилі вздовж поверхні дорівнює довжині хвилі в середовищі  $l$ , то очікується виникнення стоячої хвилі. Ця умова перетворюється на:

$$2\pi a \approx (\lambda/n_{eff}), \quad (1.4)$$

оскільки  $\lambda/n_{eff}$  - довжина хвилі в середовищі.

Тоді умова резонансу буде виглядати:

$$x = 2\pi a/\lambda \approx l/n_{eff} \quad (1.5)$$

Число довжин хвиль  $l$  в окружності можна ідентифікувати як кутовий момент (рис.1.5).

Її імпульсом є:

$$p = \hbar k = \hbar 2\pi n_{eff} / \lambda, \quad (1.6)$$

де  $k$ -хвильове число [9].

Мікросферні резонатори зазвичай формуються за допомогою поверхневого натягу і були продемонстровані у вигляді сфер, виготовлених із матеріалів у рідкій, аморфній і кристалічній формах. Найпростішим, а також раннім продемонстрованим оптичним мікрорезонатором є крапля рідини мікронного розміру з майже ідеально сферичною поверхнею через поверхневий натяг. Складно практично використовувати краплі в якості резонаторів МШГ через повільне випаровування та через те, що ними важче маніпулювати ніж твердотільними резонаторами [2].

Тим не менше, рідкі резонатори виявилися корисними у спектроскопії, флуорисценції і генерації барвників. Нещодавно було показано, що рідкокристалічні краплі можуть бути на ва порядки краще налаштовуватися, ніж будь який твердотільний резонатор при високій добротності, можливо, відкриваючи дорогу для нових видів датчиків.

Перший твердотільний мікросферний резонатор був продемонстрований в плавленому кварці. Якщо наконечник кварцового оптичного волокна плавиться вогнем або електричною дугою, розплавлений кремній утворює гладку сферу, щоб мінімізувати його поверхневу енергію. Якщо потім прибрати полум'я або електричну дугу, розплавлений кремній твердне в мікросфері, і його радіус регулюється шляхом регулювання розміру наконечника волокна.

Мікросфери з плавленого кварцу дуже чутливі до зовнішніх забруднювачів, таким як вода і абсорбція ОН, тому необхідно бути обережним і забезпечувати інертне середовище для таких резонаторів [2].

### 1.2.1.2 Частотні спектри власних коливань сферичного мікрорезонатора

Власні моди електромагнітного поля всередині діелектричної сфери радіуса  $a$  поміщеної у вакуум, описані в сферичних координатах  $(r, \vartheta, \varphi)$ :

$$\psi_{N,l,m}(r, \vartheta, \varphi) = \begin{cases} AP_l^m(\cos\vartheta)e^{im\varphi}j_l(k_{1,\zeta}r); r < a \\ BP_l^m(\cos\vartheta)e^{im\varphi}h_l(k_{0,\zeta}r); r > a \end{cases} \quad (1.7)$$

$$k_{1,\zeta} = k_{0,\zeta}\sqrt{\varepsilon\mu} \quad ; \quad (1.8) \quad k_{0,\zeta} = \frac{\omega\zeta}{c_0} \quad , \quad (1.9)$$

де  $\omega_\zeta$ - кутова частота резонансу;  $c_0$  – швидкість світла у вакуумі;  $\varepsilon$  – відносна електрична проникність;  $\mu$ - відносна магнітна проникність сфери.

Тут  $N$ ,  $l$  і  $m$  є радіальними, полярними і азимутальними номерами мод відповідно, які поряд з поляризацією  $p$  визначають однозначну власну моду. Резонансна частота залежить тільки від показників  $N$ ,  $l$  і від поляризації, але не від  $m$ , таким чином виродження мод  $2l+1$  [2].

Тут  $N \in \mathbb{N}$  рівне числу максимумів поля вздовж радіального напрямку всередині сфери,  $l \in \mathbb{N}$  рівне приблизно кількості хвиль, які можуть вписатися в оптичну довжину екватора і  $m \in \{-l, \dots, l\}$  визначає напрямок (по часовій стрілці або проти часової) циркуляції хвилі навколо екватора і його хвильового числа в цьому напрямку.  $l - m + 1$  рівне числу максимумів поля в полярному напрямку.

Для невеликих показників  $l$  режим заповнює майже увесь об'єм сфери, тоді як для великих індексів  $l$  мода сильно локалізована поблизу поверхні сфери (рис.1.6) [2].

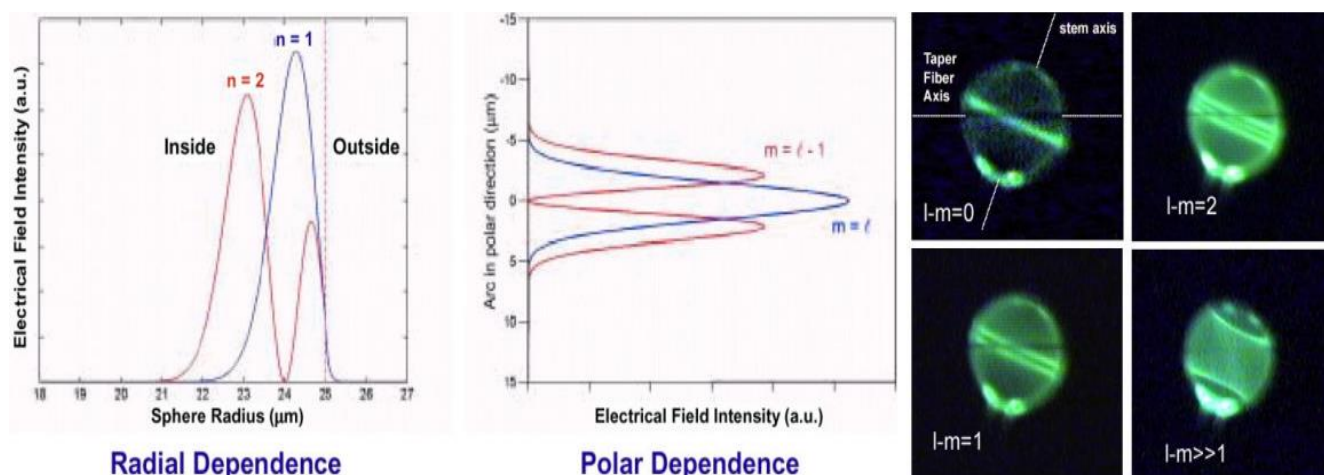


Рисунок 1.6 Радіальна та полярна залежність напруженості поля для власних мод сферичного резонатора, [2]

На рис.1.6 показана радіальна та полярна залежність напруженості поля для власних мод сферичного резонатора, що демонструє значення номерів режимів (ліворуч) та фотографію окремих режимів галереї шепотів, видимих імплантованими іонами  $\text{Er}^{3+}$  через люмінесценцію вгору (праворуч).

Таким чином, якщо обрати  $N = 1$  то не отримаємо коливань всередині сфери і для великих показників  $l$  отримуємо моди, які розміщені дуже близько до поверхні сфери. Якщо обрати  $m = l$  отримаємо одне коливання в полярному напрямку.

Ці властивості дуже нагадують властивості, які приписував лорд Релей своїм хвилям шепочучої галереї і тому ми називаємо моди з  $N = 1$ ,  $m = l \gg 1$  модами ШГ [2].

### 1.2.2 Оптичний Bottle мікрорезонатор МШГ

Пляшковий мікрорезонатор (рис.1.7) по суті є циліндричним резонатором МШГ, в якому діаметр циліндра змінюється в осьовому напрямку. Зазвичай його виготовляють із стандартного оптичного волокна, він складається з товстої порції кварцового волокна, яка зажата двома тонкими порціями кварцового волокна.



Рисунок 1.7 Геометрія оптичного пляшкового резонатора (ліворуч) та хибна кольорова мікрофотографія флуоресцентного резонатора, легованого іонами ербію (праворуч) [2]

Добротність для такого резонатора може досягати  $10^8$  у повітрі. Пляшкові резонатори мають унікальну каустику у профілі моди, яка може бути зручно використана для з'єднання з конусним волокном. Окрім того з'єднання з МШГ можливе у великій області вздовж розміру осі мікрорезонатора, що робить можливим надійне з'єднання з конусним волокном [2], [10].

Пляшковий резонатор в режимі шепочучої галереї був запропонований нещодавно. Мікрорезонатори з подвійною горловиною мають ряд особливостей, які відрізняють їх від екваторіальних резонаторів МШГ, таких як мікросфери і мікротороїди. Пляшкові резонатори є сильно сплюснутими резонаторами і підтримують невироджені МШГ, які демонструють дві добре розділені просторові області з підвищеною напруженістю поля, відповідні модальним точкам повороту. Припускається, що вільний спектральний діапазон таких резонаторів приблизно на порядок менший ніж у мікросферних резонаторів однакового діаметра. Це пов'язано з тим, що такі мікрорезонатори також можна розглядати як узагальнені порожнини Фабрі-Перо, в яких «косі» промені повністю відбиваються в двох точках повороту поблизу горла пляшки. Це призводить до набагато більшої оптичної довжини шляху і, відповідно, до зменшення FSR [2].

Досі пляшкові мікрорезонатори виготовлювалися, в основному, по технології «нагрівання і витягування» з використанням модифікованих конічних волоконних бурових установок. Лазер на  $\text{CO}_2$  використовувався на локального нагріву волокна, коли воно витягувалося. Але ранні спроби створення привели до

незадовільної якості мікрорезонатора. Щоб це виправити нещодавно були розроблені удосконалені волоконні конічні установки, які використовують дві високоточні лінійні ступені з комп'ютерним управлінням. Цей метод виробляє мікропляшкові резонатори в два етапи шляхом послідовного мікрозвуження волокна в двох суміжних місцях для формування «пляшки» [11].

### 1.2.2.1 Частотні спектри власних коливань

Зазвичай профіль товщини оптичного волокна навколо пляшки є приблизно параболічним в осьовому напрямку

$$z: R(z) = R_0(1 - \frac{1}{2}(\Delta k \cdot z)^2), \quad (1.10)$$

де  $R_0 = R(0)$  максимальний радіус пляшки і  $\Delta k$  - це осьова кривизна резонатора. Цей профіль товщини вводить ефективний потенціал, подібний лінійному гармонічному осцилятору, в осьовому напрямку, і, таким чином, досягається повне обмеження світла в резонаторі. Це вірно в наближенні адіабати ( $|\frac{dR}{dz}| \ll 1$ )<sup>20</sup>.

Власні моди електромагнітного поля можна записати в циліндричних координатах  $(r, \vartheta, \varphi)$ , всередині волокна (використовуючи функції Беселя першого роду):

$$\psi_{N,l,m}(r, \vartheta, \varphi) = A e^{im\varphi} J_m\left(\frac{mr}{R(z)}\right) Z_q(z) \quad (1.11)$$

Тут  $m$  азимутальний і  $q$  осьовий номер режиму. Вони разом із поляризацією  $p$  (TE чи TM), однозначно визначають режим. Ми можемо уявити як світло відбивається назад і вперед всередині ЛНО (квантове число, яке визначає кількість вузлів осьового розподілу інтенсивності) в осьовому напрямку (рис 1.8), створюючи стоячу хвилю при виконанні умови резонансу.

На резонансі світло створює каустику (область підвищеної інтенсивності) в точках повороту  $\pm z_c$  для класичного руху всередині ЛНО. Там ми можемо уявити,

що світло відбивається ніби потрапляє в дзеркало (як в інтерферометрі Фарбі-Перо).

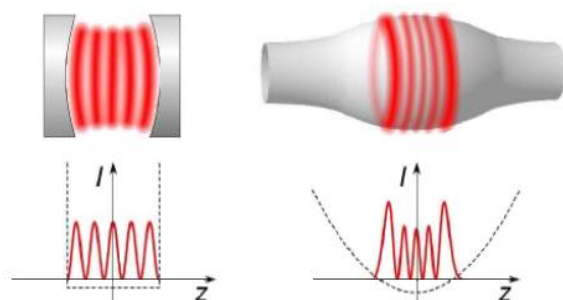


Рисунок 1.8 Порівняння оптичних  
пляшкових резонаторів (зліва в  
центрі) з резонатором Фарбі-Перо  
(ліворуч) [2]

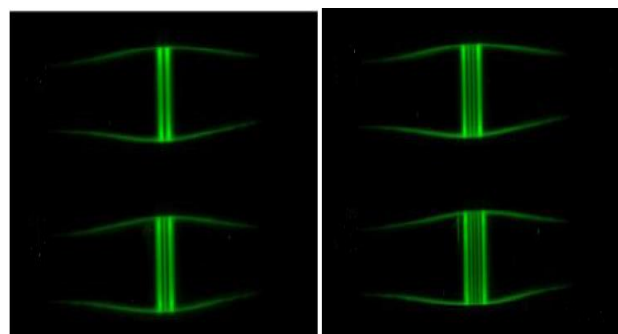


Рисунок 1.9 Мікрофотографія режимів  
резонаторів [2]

Спектр мікрорезонатора оптичної пляшки визначається хвильовим числом всередині пляшки  $k_1$  як:

$$k_{1,m,q} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{m^2}{R_0^2} + (q + \frac{1}{2})\Delta E_m} = \frac{m}{R_c}, \quad (1.12)$$

де  $\Delta E_m = \frac{2m\Delta k}{R_0}$  - ефективна відстань енергії ЛНО,  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  показник заломлення оптичного волокна і довжина хвилі світла у вакуумі.  $R_c = R(\pm z_c)$  позначає радіус пляшки на каустиці.

Для все більшого  $q$  і більшого  $m$  цей радіус зменшується, і тому осьове положення каустики збільшується зі збільшенням номерів мод.

### 1.2.3 Кільцевий мікрорезонатор з МШГ

Важливим різновидом хвилеводних структур інтегральної фотоніки є резонансні структури - кільцеві мікрорезонатори. В останні роки вони представляють все більший інтерес для дослідників в області хвилеводної і

інтегральної оптики. Резонансні структури є потенційними кандидатами для використання в таких областях застосування інтегральної фотоніки як фільтрація хвиль, маршрутизація, перемикання, модуляція, конвертація, мультиплексування і демультиплексування оптичного випромінювання [12].

Оптичні кільцеві резонатори працюють по принципам повного внутрішнього відбиття, конструктивних завад і оптичних зв'язків. Концепції, які лежать в основі оптичних кільцевих резонаторів ті ж, що і у шепочучої галереї, за виключення того, що вони використовують світло і підпорядковуються властивостям конструктивної інтерференції з повним внутрішнім відбиттям.

Коли світло з резонансною довжиною хвилі пропускається через петлю від вхідного хвилеводу, воно підсилюється за декілька циклів, викликаних конструктивними завадами, і виводиться на вихідний хвилевод, який служить в якості детектора хвилеводу.

Так як декілька обраних довжин хвиль будуть мати резонанс в контурі, оптичний кільцевий резонатор функціонує як фільтр.

### 1.2.3.2 Спектр

Мікрорезонатор є оптичним компонентом, який забезпечує світло завдяки повному внутрішньому відбиттю, яке може бути створене методами мікро/нанотехнологій. Кільцевий резонатор складається з шини і кільця їх розміри можуть змінюватися в залежності від виду зв'язку (симетричного або асиметричного) [13].



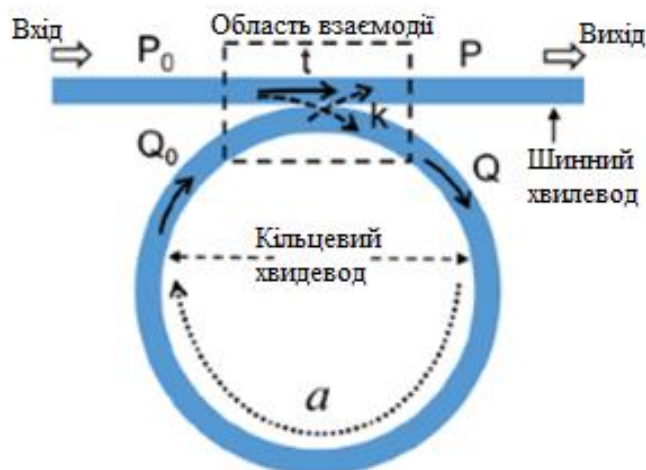


Рисунок 1.10 Схематичне зображення простого багатоходового кільцевого мікрорезонатора [13]

На Рис.1.10 показаний багатоходовий кільцевий резонатор, в якому співвідношення між входом ( $P_0, Q_0$ ) і виходом ( $P, Q$ ) матиме вигляд:

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

$$P = (1 - \gamma)^{\frac{1}{2}} [P_0 \cos(kl) - jQ_0 \sin(kl)] \quad (1.14)$$

$$Q = (1 - \gamma)^{\frac{1}{2}} [P_0 \cos(kl) - jQ_0 \sin(kl)] \quad (1.15)$$

$$R = \begin{pmatrix} t & jk \\ jk^* & t^* \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

Де  $k, l, \gamma$  – коефіцієнти зв'язку мод, довжина зв'язку і коефіцієнт втрат відповідно. Амплітуда передачі і зв'язку сильно залежать від коефіцієнтів передачі і зв'язку.

Інтенсивність пропускання і зв'язку в залежності від довжини хвилі матиме:

$$T(\lambda) = (1 - \gamma) \left[ \frac{a^2 - 2at \cos(\lambda) + r^2}{1 - 2at \cos(\lambda) + (at)^2} \right] \quad (1.17)$$

де  $a$  – це передача амплітуди в одному напрямку,  $t$  - коефіцієнт передачі, для випадку без втрат  $t^2 + a^2 = 1$ . На рис.1.11 показана передача і зв'язана потужність в залежності від довжини хвилі. Передача і зв'язана потужність змінюється зі зміною  $a$ ,  $t$ . Окрім того, потужність передачі, сила зв'язку також залежать від довжини муфти [13].

Критичний зв'язок  $a = t$  або  $1 - a^2 = k^2$  потужність, що передається рівна втратам в кільці. На рис.1.11 (а) (б) показана нормалізована передача в залежності від довжини хвилі. На рис.1.11 (а) коефіцієнт передачі  $t$  змінюється з постійною ( $a = 0.95$ ) передачі амплітуди в обидва боки. По мірі збільшення коефіцієнта  $t$  коефіцієнт вилучення зменшується. Різкість  $S$  передачі збільшується при збільшенні  $t$ . Тому ширина смуги пропускання 3 дБ кривої передачі зменшилася.

На рис.1.11 (б) показана нормалізована передача в критичних умовах зчеплення ( $a = t$ ). По мірі того, як значення  $a = t$  збільшується,  $T_{\max}$  і  $S$  зростають. На рис.1.11 (в) показана нормалізована потужність передачі і зв'язку в залежності від довжини хвилі як для критичних так і для некритичних умов відповідно. В критичних умовах зв'язку потужність, що передається і зв'язана потужність показують максимальне значення  $T_{\min}$  і  $T_{\max}$  відповідно.

На рис.1.11 (а-с) вільний спектральний діапазон був зафіксований через постійність вимірів ШГ. На рис.1.11 (г) показана FSR як функція округлої трійної довжини.

Значення FSR сильно залежить від ширини ШГ. Це зв'язано з тим, що груповий індекс  $n_g$ , змінюється зі зміною ширини ШГ. Окрім того через збільшення  $L$ , значення FSR буде зменшуватися. Тому маленький кільцевий резонатор збільшить FSR, але це збільшує складність виготовлення. З цього слідує, що необхідний компроміс між геометрією приладу і продуктивністю [13].

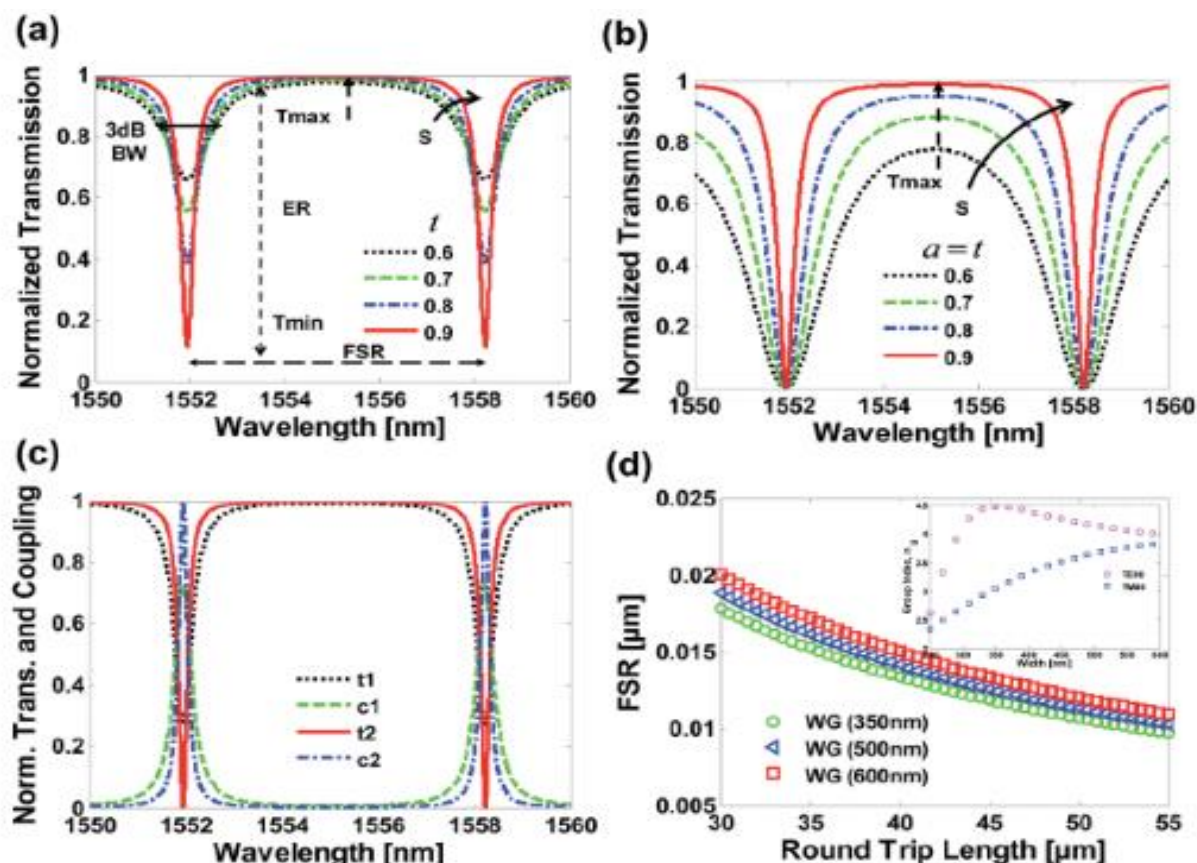


Рисунок 1.11 Властивості передачі і зв'язування в резонаторі. (a-b) нормалізована передача, як функція довжини хвилі. (c) нормалізована передача і зв'язана потужність як функція довжини хвилі (d) FSR як функція довжини двостороннього руху. Робоча довжина хвилі (55,55 нм), постійна і індекс групи  $n_g$ , вимірюється для різних розмірів WG. На вставці показаний індекс групи  $n_g$ , як функція ширини хвилеводу для фундаментальної  $TE_{00}$  моди.

### 1.2.3.3 Коефіцієнти зв'язку

Розглянемо зв'язок кільцевого резонатора з лінійним хвилеводом. Коли промінь світла проходить через хвилевод, як показано на рис. частина світла буде підключена до оптичного кільцевого резонатора.

Причиною цього є явище зникаючого поля, яке виходить за межі хвилеводної моди і експоненційно зменшується в радіальному профілі. Іншими

словами, якщо кільце і хвилевод зближені, деяка кількість світла із хвилеводу може потрапити в кільце.

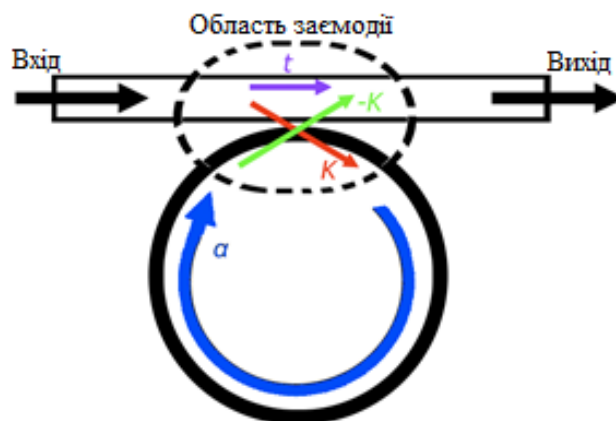


Рисунок 1.12 Візуальне зображення коефіцієнтів зв'язку [14]

На оптичний зв'язок впливають три аспекти : відстань, довжина зв'язку і показники заломлення між хвилеводом і оптичним кільцевим резонатором. Щоб оптимізувати зв'язок необхідно звузити відстань між кільцевим резонатором і хвилеводом. Чим вужче відстань, тим легше відбувається оптичний зв'язок. Довжина зв'язку представляє собою ефективну довжину кривої кільцевого резонатора для явища зв'язку, яке відбувається з хвилеводом.

Ще однією особливістю оптичного зв'язку є критичний зв'язок. Критичний зв'язок показує, що світло не проходить через хвилевод після того як світловий промінь підключений до оптичного кільцевого резонатора. Світло буде збережене або втрачене всередині резонатора після цього.

Зв'язок без втрат – це коли світло не передається через вхідний хвилевод на його власний вихід, замість цього все світло з'єднується з кільцевим хвилеводом. Щоб відбулося з'єднання без втрат необхідно щоб виконувалося наступне рівняння:

$$|K|^2 + |t|^2 = 1, \quad (1.18)$$

де  $t$ - коефіцієнт передачі через відгалужувач, а  $K$  коефіцієнт відбиття [14].

### 1.3 Висновки з розділу 1

В розділі були представлені найрозповсюдженіші форми оптичних мікрорезонаторів з модами шепочучої галереї. МР мають доволі високу добротність, що і робить їх привабливими для використання у різних типах фільтрів, стабілізуючих елементах, пристроях оптичного зв'язку.

Відомо, що окрім високої добротності, мікрорезонатори мають значний недолік такий як підвищена щільність спектру. Параметри розсіювання різних оптичних приладів можуть бути значно покращенні при використанні мікрорезонаторів різних форм.

Так як форми і матеріал резонатора обираються для певної задачі, то однозначно визнати першість одного з них неможливо, але все ж хотілося виділити кільцеві мікрорезонатори, які найчастіше використовуються при моделюванні фільтрів.

Вони мають два важливих атрибути, а саме функціональність і компактність. Функціональність стосується до того факту, що широкий спектр бажаних характеристик фільтра може бути синтезованим шляхом об'єднання декількох кілець, а компактність полягає у тому, що кільцеві резонатори з радіусами менш ніж 25мк можуть привести до великомасштабної інтеграції приладів зі щільностями порядку  $10^4$ - $10^5$  приладів на квадратний сантиметр.

В цій технології, вертикально з'єднанні скляні мікрокільцеві резонатори, виявилися універсальним засобом реалізації недорогих високоякісних WDM-компонентів.

Особлива перевага вертикальної структури полягає в тому, що шар шинного хвильоводу не залежить від шару кільцевого резонатора. Тому кожен шар можна оптимізувати незалежно, з низькими вхідними/вихідними втратами і втратами на поширення для шинних хвильоводів, а також з компактністю і низькими втратами на вигин при вигині для кільцевого хвильоводу.

## 2. ОПТИЧНІ ADD/DROP ФІЛЬТРИ НА ОСНОВІ МІКРОРЕЗОНАТОРІВ

Унікальні спектральні властивості резонаторів WGM, а саме вузька ширина лінії, можливість переналаштування і висока стабільність, роблять їх дуже привабливими для застосування в області фільтрації. В оптичних телекомунікаціях основним завданням фільтрів є вибір каналів в схемах мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) [9].

Системи Add/drop (Рис.2.1), утворені резонаторами з модами шепочучої галереї, з'єднані збоку з двома хвилеводами або конусними оптичними волокнами, знайшли своє застосування в багатьох областях, також зростає інтерес до їх використання в якості оптичних фільтрів, мультиплексорів, демультимплексорів і комутаторів в оптичних мережах зв'язку.

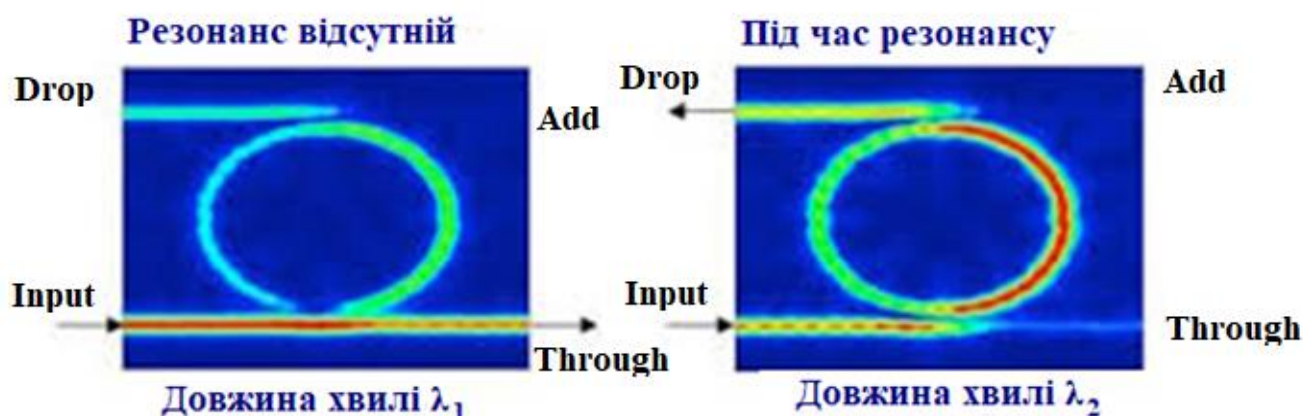


Рисунок 2.1 Однорезонаторний Add/Drop фільтр без резонансу і в стані резонансу

Add/Drop фільтр (ADF), який базується на МШГ обирає і передає світловий сигнал з його резонансною довжиною хвилі або в add, або в drop порт в залежності від того, яких з двох портів використовується. Сигнали з нерезонансними довжинами передаються через хвилевод без зв'язку з резонатором. [15]

## 2.1 Add/Drop фільтр на основі оптичних кільцевих резонаторів

Кільцевий резонатор розміщений між двома оптичними хвилеводами щоб забезпечити ідеальну базову структуру для ADF на основі кільцевого резонатора. В цій структурі шинний хвилевод може з'єднуватися з кільцевим резонатором на його резонансній частоті для захвату електромагнітної енергії, яка розповсюджується у хвилеводі, і локалізації її в кільцевому резонаторі.



Рисунок 2.2 Схематична структура ADF на основі кільцевого резонатора [16]

На рис.2.2 наведена схематична структура ADF на основі кільцевого резонатора, який складається з шини, хвилеводів розгалуження і кільцевого резонатора (елемент зв'язку), окрім того він має 4 порти: порти 1 і 2 є вхідними і вихідними терміналами передачі, тоді як порти 3,4 є терміналами прямого і зворотного розгалуження (dropping) відповідно [16].

### 2.1.1 Принцип роботи

Якщо кільцевий резонатор підтримує тільки одну резонансну моду, то він затухає через два хвилеводи у прямому і зворотному напрямку. З цього слідує,







Крім того, через виникнення виродження, хвиля що входить деструктивно заважає загасаючій амплітуді в прямому напрямку шинних хвильоводів, чим і анулює всю потужність, що розповсюджується в шинному хвильоводі. Симетрія резонансних мод щодо площини дзеркала, паралельного хвильоводам, визначає напрямок хвилі перенесення в ADF.

Наприклад, як видно із рис.2.3 (а), (б) і (в), коли обидві моди є парними відносно площини паралельно дзеркала, амплітуди згасання вздовж зворотного напрямку drop хвильоводу будуть анульовані, що дозволить передати всю потужність в прямому напрямку drop хвильоводу.

З іншого боку парна мода може бути непарною відносно площини дзеркала, паралельного хвильоводу. Коли відбувається випадкове виродження між станами, згасаючі амплітуди подавляються в прямому напрямку drop хвильоводу рис.2.4 (а), (б), (в). Вся потужність передається у зворотному напрямку drop хвильоводу.

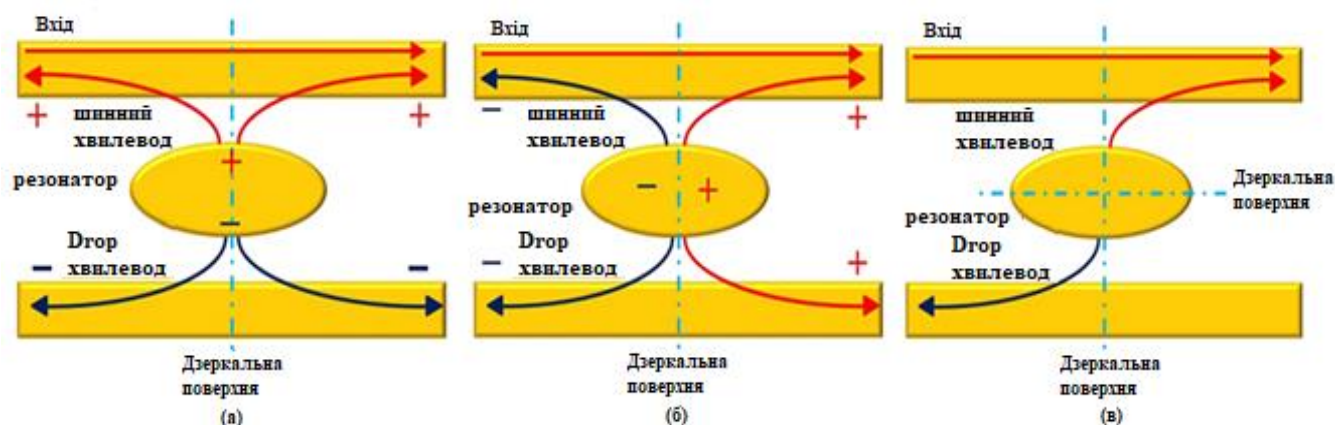


Рисунок 2.4 Процес каналного тунелювання каналу для резонаторної системи, що підтримує зворотну передачу сигналу [16]

Резонансний зв'язок PCRR відбувається через узгодження частоти і фази між модою хвильоводу і модою резонатора PCRR. Напрямок з'єднання в основному визначається модальною симетрією і відносним зв'язком між PCRR.

Як пряме так і зворотне розгалуження можуть бути отримані в залежності від властивостей симетрії моди відносно конфігурації зв'язку [16].

### 2.1.2 Вимоги до ADF

Продуктивність фільтра визначається ефективністю передачі (ефективністю зв'язку та ефективністю розгалуження) між двома хвилеводами. Ідеальна ефективність відповідає повній передачі обраного каналу в прямому або зворотному напрямку в drop хвилеводі без прямої передачі або зворотного відображення в шинному хвилеводі. Всі інші канали залишаються непорушними наявністю оптичних резонаторів.

Для досягнення повної передачі сигналу в резонансі ADF на основі PCRR мають задовольнятися умови:

1. Резонатор повинен мати щонайменше дві резонансні моди, кожна з яких повинна бути парною і непарною по відношенню до дзеркальної площини симетрії, перпендикулярної хвилеводам.

2. Моди повинні вироджуватися.

3. Моди повинні мати рівні добротності  $Q$

Всі ці три умови необхідні для повної передачі сигналу від шинного хвилеводу до PCRR і для того щоб PCRR розгалузив хвилевод [2].

## 2.2 ADF- фільтр на базі квадратного/квазі-квадратного фотонно-кристалічного резонатора

Структура фільтра на базі квадратного фотонно-кристалічного резонатора наведена на рис.2.5. Розглянемо ADF на основі квадратного резонатора, показник заломлення діелектричних стержнів складає 3,59, оточений повітрям ( $n=100$ ). Радіус стержня і постійна решітки становить 100 і 540 нм відповідно.

Поперечний діапазон ширини забороненої зони структури становить від  $0.303a / \lambda$  до  $0.425a / \lambda$ , відповідний діапазон довжин хвиль якого охоплює від 1270 до 1740 нм, де «а» є постійною решітки, а « $\lambda$ » - довжиною хвилі у вільному просторі [16].



Рисунок 2.5 Схематична структура ADF на основі квадратного фотонно-кристалічного кільцевого резонатора (RCRR) [16]

ADF на базі квадратного PCRR складається з двох горизонтально розміщених хвильоводів і квадратного PCRR розміщеного між ними. Шина і хвильоводи розгалуження утворюються шляхом введення дефектів лінії, тоді як квадратний PCRR формується шляхом створення точкових дефектів (тобто видаленням стовпчиків стержнів для формування квадратної форми).

При резонансі довжина хвилі з'єднується з шинним хвильоводом і drop хвильоводом та виходить через один з вихідних портів.

Ефективність з'єднання і розгалуження визначається шляхом контролю потужності на портах «B», «C» і «D» відповідно. Нормалізовані спектри пропускання квадратного ADF на основі PCRR зображені на рис.2.6 (червоний колір), де ефективність зв'язку, ефективність розгалуження і спектральна вибірковість фільтра також є низькими [16].

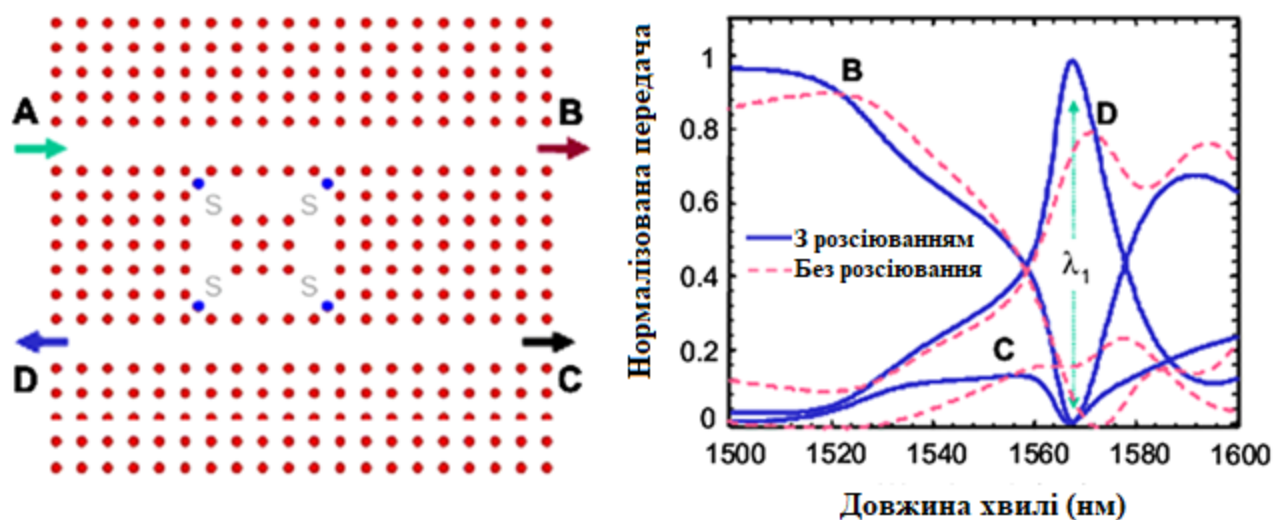


Рисунок 2.6 Схематична структура і нормалізовані спектри пропускання квазіквадратного ADF на основі PCRR [16]

Щоб підвищити ефективність зв'язку, ефективність розгалуження і спектральну селективність шляхом подавлення режимів зустрічного розповсюдження, стержні синього кольору, так звані стержні розсіювання (позначаються «s»), розміщують у кожному кутку чотирьох сторін, з постійною напіврешітки, яка перетворює квадратну структуру в квазі-квадратну структуру. З цього слідує, що режими зустрічного розповсюдження можуть викликати помилкові провали в спектрі передачі [16].

Схематична структура і нормалізовані спектри пропускання квазі-квадратного ADF на основі PCRR показані на рис.2.6 відповідно.

Гауссовський оптичний імпульс, який охоплює весь частотний діапазон, що нас цікавить, запускається на вхідному порті А. Монітори потужності були розміщені на кожному з трьох інших портів (В, С, D) для збору спектральної щільності потужності переданого сигналу після перетворення Фур'є. Всі спектральні щільності потужності переданого сигналу були нормалізовані до спектральної щільності потужності падаючого світла від вхідного порту «А».

Резонансна довжина хвилі, ефективність зв'язку, ефективність падіння і Q добротність квазіквадратного ADF на основі PCRR становить 1567 нм, 100%, 98% і 160 відповідно. Відзначено, що для порожнини без стержнів розсіювання

досягається низький зв'язок (90%) і ефективність скидання (75%) з низькою спектральною селективністю. Просто ввівши чотири розсіювача, продуктивність ADF значно поліпшується. Добротність (спектральна селективність) може бути поліпшена шляхом збільшення сполучних стержнів між кільцевим резонатором і хвилеводом [16].

ADF на основі квазі-квадратного PCRR додатково призначений для поліпшення ширини смуги пропускання. Ширина смуги пропускання може бути збільшена за рахунок поліпшення зв'язку між хвилеводом і резонатором, що може бути зроблено за рахунок зменшення радіуса з'єднувального стержня. У цій структурі розмір сполучних стержнів становить 99 нм.

На рис.2.7 показана схематична структура і її нормовані спектри пропускання ADF на основі квазі-квадратного PCRR з радіусом сполучного стержня 99 нм. Резонансна довжина хвилі структури становить 1567 нм. Як видно на рис.2.7, пропускання в хвилеводі розгалуження становить близько 98% при резонансі, а переданий потік в шинному хвилеводі становить близько 96%. Ширина смуги пропускання і добротність цієї структури становить 30 нм і 52,33 відповідно [16].

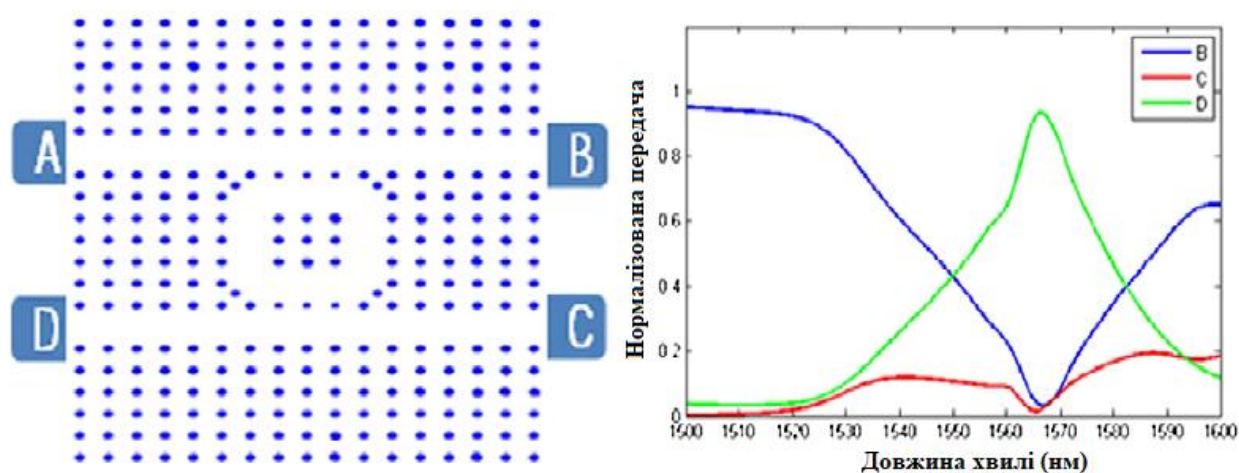


Рисунок 2.7 Схематична структура і нормалізовані спектри пропускання квазі-квадратного PCRR на основі ADF [16]

### 2.3 ADF- фільтр на базі кільцевого фотонно-кристалічного резонатора з подвійним вигином

Резонатор представляє собою два пов'язаних вигнутих резонатора Фабрі-Перо (рис.2.8), кожен з яких представляє собою резонатор Фабрі-Перо з криволінійною структурою, а не з прямим замкнутим хвилеводом. Довжина і радіус кривизни резонатора можуть бути обрані відповідно до умов наявності більш компактних оптичних інтегральних мікросхем фотонного кристала, конкретної робочої довжини хвилі, збільшення рознесення мод або більш високої добротності і ефективності розгалуження [16].

Структура складається з фону зі скла BSC і стержнів GaAs, що мають показник заломлення 1,507 і 3,57 відповідно. Радіус стержня  $r = 0.2a$ , де  $a$  складає 487нм. Нормальний частотний діапазон від  $0,259a / \lambda$  до  $0.325a / \lambda$ .

Двовигнутий PCRR складається з двох викривлених резонаторів Фабрі – Перо, в яких енергією можна обмінюватися між собою за допомогою зчеплення з нескінченною хвилею.

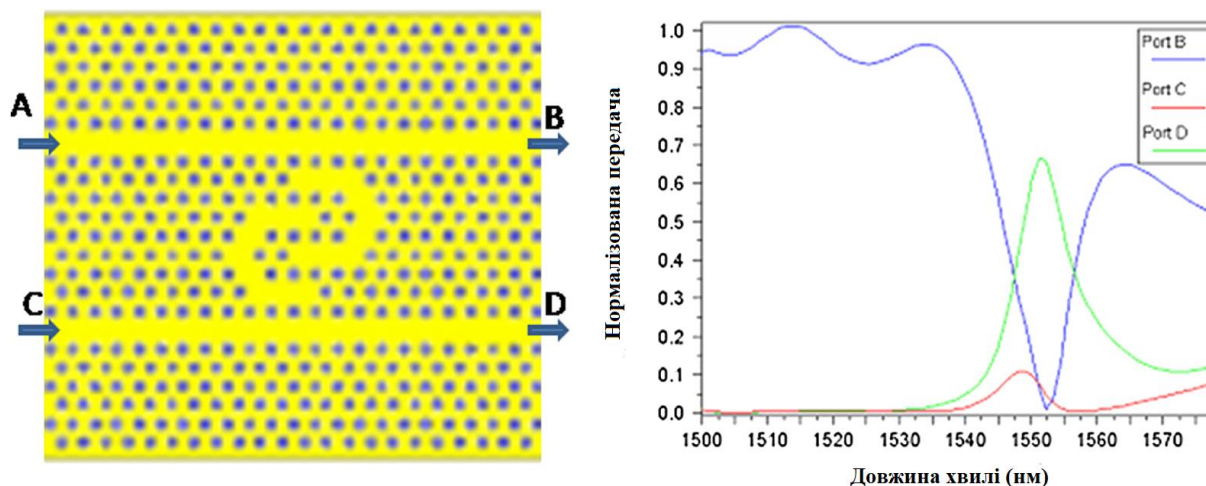


Рисунок 2.8 (а) Схематична структура і (б) нормалізовані спектри пропускання ADF з подвійною зігнутої PCRR [16]



В резонаторі, який обернений до двох вигнутих площин одна до одної, виникають три точки контакту з високою інтенсивністю зв'язку замість однієї, знайденої у зв'язаних звичайних резонаторах Фабрі-Перо або кільцевих резонаторах. Добротність  $Q$ , відбита потужність до вхідного порту, ефективність падіння і спектри пропускання впливають на товщину бар'єру між двома зв'язаними резонаторами [16].

#### 2.4 ADF- фільтр на базі кільцевого х-подібного фотонно-кристалічного резонатора

Конструкція ADF на основі Х-подібного PCRR базується на 2-D трикутній решітці кремнієвих стержнів. Показник заломлення стержня Si становить 3,46, і вони вбудовуються в повітряний фон ( $n_{\text{air}} = 1,00$ ). Схематична структура і нормовані спектри пропускання ADF на основі Х-подібного PCRR показані на рис.2.9. Відношення радіуса стержня  $r$  до постійної решітки  $a$  дорівнює 0,2.

Структура має PBG (фотонну заборонену зону) тільки для ТМ поляризації з одномодовою частотою (нормалізованою) в межах від  $0,337a/\lambda$  до  $0,442a/\lambda$ , де постійна  $a$  встановлена як 607.6нм. Вісім додаткових стержнів розсіювача включені, щоб поліпшити спектральну селективність і отримати дуже високу ефективність розгалуження.

Ці розсіювачі мають точно такі ж показники заломлення, як і всі інші діелектричні стержні в структурі РС, і їх діаметри обрані для  $r = 0.965r$  для кращої продуктивності. З рис.2.9 зрозуміло, що на 100% ( $>99,98\%$ ) ефективність розгалуження спостерігається на резонансній частоті 1550 нм.

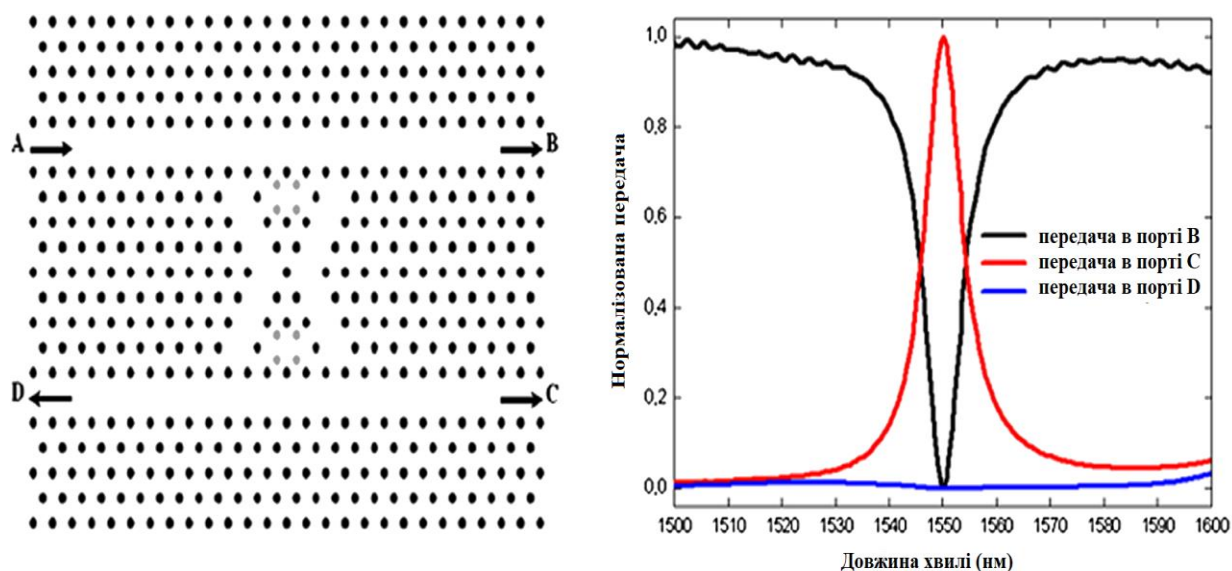


Рисунок 2.9 (а) Схематична структура і (б) нормовані спектри пропускання Х-подібного PCRR на основі ADF [16]

Цілком зрозуміло, що єдиний PCRR відповідає за одну резонансну довжину хвилі. Отже, також можна отримати два або більше резонансних довжин хвиль за допомогою каскаду одного PCRR.

Подвійний ADF на основі PCRR також досліджений для квазі-квадратних PCRR і 45-deg PCRR в інших монографіях. Продуктивність цих фільтрів не є кращою, ніж у мікроконтактних резонаторів [16].

## 2.5 ADF- фільтр на базі Bottle мікрорезонатора

Оптичні резонатори з шепочучою галересю з симетричною структурою, які обмежують світло безперервним внутрішнім відбиттям, широко досліджувалися через малий об'єм мод і високої добротності

У роботі [17] був досліджений вузькополосний Add/Drop фільтр на основі bottlelike мікрорезонатора з двома конічними волокнами. Нас рис.2.10 схематичне зображення ADF.



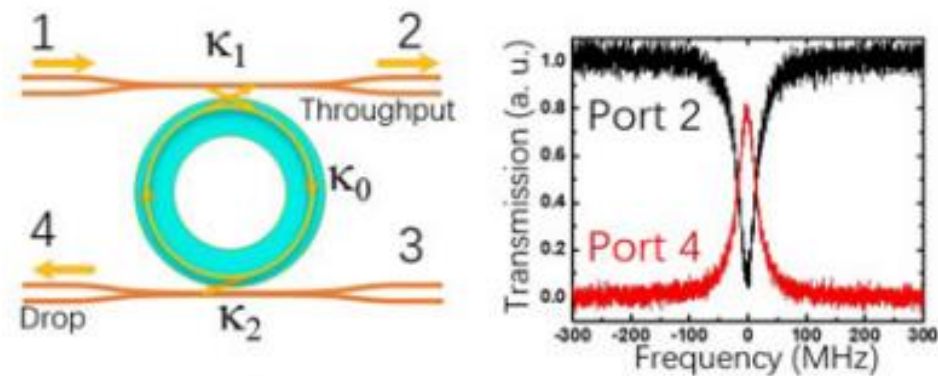


Рисунок 2.10 Схематичне зображення ADF і типові спектри передачі [17]

Порти 1 і 3 є входним портам і add портом відповідно, порти 2 і 4 є портом пропускної здатності і drop портом.  $k_0$  - внутрішня втрата в бидва кінці.  $k_1$  і  $k_2$  – втрати зв'язку на шині хвильовод-резонатор і нависному хвильоводі відповідно. Типові спектри передачі, виявленні на пропускному порті 2 (чорний) і на drop (червоний).

Також у цьому досліді були отримані експериментальні і теоретичні залежності drop ефективності від втрат зв'язку, як показано на рис.2.11.

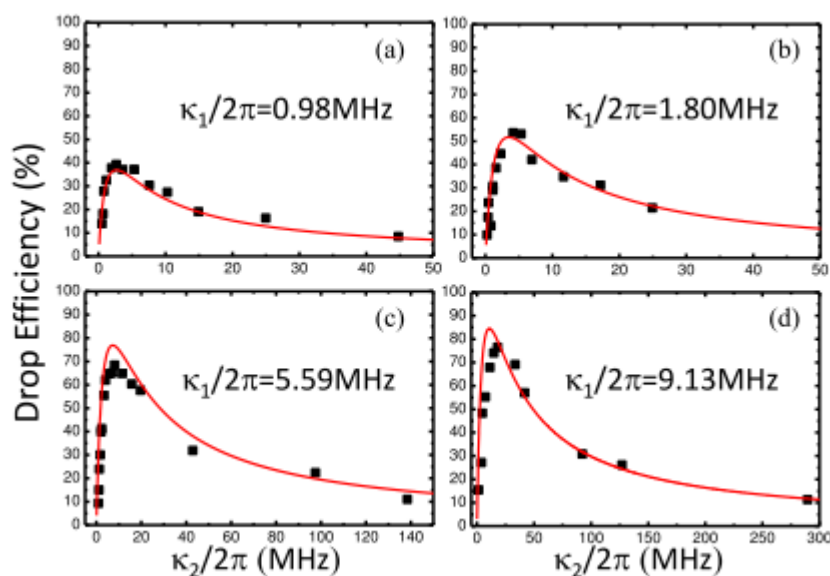


Рисунок 2.11 Експериментальні (чорні крапки) і теоретичні (червоні лінії) результати, які показують зв'язок між резонатором шини і хвильоводу  $k_1$  і втрат на зв'язок з приєднанням хвильоводу від резонатора  $k_2$  [17]

На рис.2.11 показані експериментальні і теоретичні результати розрахунків, які показують зв'язок між резонатором шини і хвилеводу  $k_1$  і втрат на зв'язок з приєднанням хвилеводу від резонатора  $k_2$  (а)-(в) відповідають різним значенням  $k_1/2\pi$  рівним 0,98 МГц 1,80МГц 5,59МГц і 9,13МГц відповідно.

Як показано на рис.2.11 (а) оптична мода BMLR з власною швидкістю  $k_0$  зв'язана з шинним хвилеводом з коефіцієнтом втрат зв'язку  $k_1$  і з втратами зв'язку в хвилеводі Add/Drop  $k_2$  відповідно.

Drop ефективність  $D_{1 \rightarrow 4} = |a_4/a_2|^2$  визначається як відношення потужностей входу на порту 1 і виходу на порту 4, де  $a_1$  і  $a_4$  – поля вводу на вхідному порту і drop поле на drop порті 4 відповідно. По відношенню «вхід-вихід» drop ефективність визначається як:

$$D_{1 \rightarrow 4} = \frac{4k_1k_2}{4\Delta^2 + (k_0 + k_1 + k_2)^2} \quad (2.1)$$

Де  $\Delta = \omega - \omega_c$  – розстройка між частотою лазера  $\omega$  і резонансною астотою резонатора  $\omega_c$ . Тоді при резонансі  $\Delta = 0$ , drop ефективність:

$$D_{1 \rightarrow 4} = \frac{4k_1k_2}{(k_0 + k_1 + k_2)^2} \quad (2.2)$$

Drop ефективність визначається  $k_1$  і  $k_2$ , які можна контролювати, змінюючи умови з'єднання, тобто положення конічних волокон. Також були отримані нормалізовані спектри передачі на пропускному і вихідному портах.

Нас рис.2.12 відображенні нормалізовані спектри передачі на пропускному порті і на вихідному порті, відповідні входу двох лазерів з частотним інтервалом 86 МГц, знайдені за допомогою скануючого інтерферометра Фабрі-Перо.

(а) Передача, отримана із порту 2, коли мікрорезонатор не був з'єднаний з додатковими шинними хвилеводами (б) мікрорезонатор був взятий з додатковими і шинними хвилеводами з відповідними умовами зв'язку і спектр був виявлений в порту 2(в) [17].

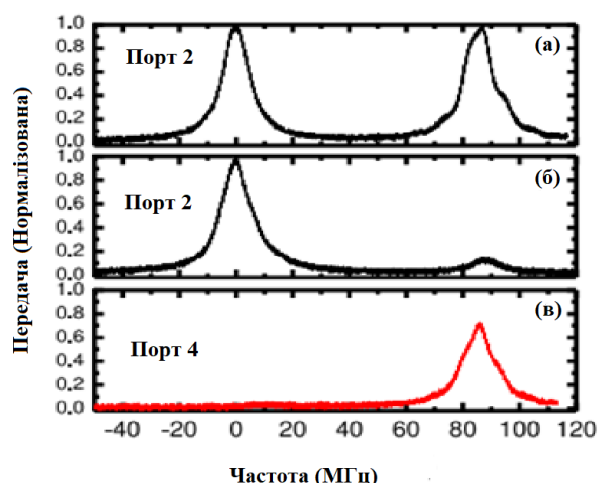


Рисунок 2.12 Нормалізовані спектри передачі на пропускному і вихідному портах [17]

## 2.6 Висновки з розділу 2

У розділі переважно були розглянуті фільтри саме на кільцевих резонаторах, тому що вони мають ряд переваг порівняно з іншими. Кільцеві мікрорезонатори – це багатообіцяючі пристрої, які забезпечують високу селективність по довжині хвилі в поєднанні з досить малими розмірами, які забезпечують щільність інтеграції до  $10^5$  приладів на квадратний сантиметр.

Поодинокі та множинні кільцеві мікрорезонатори можуть бути реалізовані в конструкціях, в яких портові хвилеводи поперечно або вертикально пов'язані з мікровідбиттями. У нашому випадку і з існуючим технологічним обладнанням конфігурація вертикального зв'язку кращим вибором, так як у цій конфігурації прямий хвилевод і кільцевий резонатори можуть бути налаштовані індивідуально. Окрім того, у процесі виготовлення вертикальне з'єднання більш стійке до змін технологій, аніж бокове.

У випадку каскадних приладів паралельна конфігурація є кращою, аніж послідовна, так як відгук фільтра, отриманий з drop порту, можна регулювати, змінюючи відстань від центру до центру найближчих сусідніх кілець [18].

Ще однією перевагою кільцевих мікрорезонаторів є їхня варіативність форми, яка дозволяє максимально точно підібрати необхідно основу для фільтрів, в залежності від поставлених задач. Також не можна забувати про простоту і дешевизну виготовлення, які значно знижують вартість приладів, основою яких вони є.

ADF на основі X-подібного PCRR забезпечує кращу продуктивність у порівнянні з іншими формами кільцевих резонаторів, однак він не досяг 100% ефективності розгалуження. Це пов'язано з правильними кутами в ADF. У вищезазначених ADF на основі PCRR, PCRR має належний кут, який зменшує вихідну потужність при резонансі через розсіювання на кутах.

Щоб подолати проблему, яка виникла, було розроблено ADF на основі кругового PCRR, де кільцевий резонатор має поступову зміну в кутах, що зменшує розсіювання і покращує вихідну ефективність за допомогою резонансних мод. ADF на основі кільцевого резонатора також забезпечує ефективний вибір довжини хвилі, масштабованість, вузьку ширину лінії, гнучкість у розробці режиму і менший інтервал каналів. Незважаючи на те, що трикутна решітка пропонує ширші заборонені зони, ніж ADF на основі РС з квадратною решіткою, але забезпечує ефективне утримання світла, легке виготовлення, просту структуру і легко керовані режими поширення. Завдяки цьому і була створена конструкція ADF на базі кільцевої системи PCRR з квадратною решіткою [16].

Можна зробити висновки, що кільцеві резонатори є кращою базою для побудови фільтрів, які в свою чергу є основою для великого ряду інших оптичних приладів таких як мультиплексори, демультиплексори, комутатори та ін.

### 3. РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОРЕЗОНАТОРНОГО ОПТИЧНОГО ФІЛЬТРА

При проектуванні фільтрів для того щоб покращити параметри розсіювання в деяких випадках необхідно побудувати фільтри на мікрорезонаторах з різними формами та з різних матеріалів. При цьому, теорія, яка описує процеси розсіювання стає більш складною і громіздкою. Тому актуальною є розробка альтернативного, спрощеного методу розрахунку параметрів таких фільтрів.

Для розробки методу ми скористалися теорією збурень для рівнянь Максвелла.

#### 3.1 Проектування однорезонаторного фільтру

Розглянемо спрощену структуру фільтра з оптичним мікрорезонатором (на цьому етапі і впродовж усіх розрахунків форма резонатора не впливатиме на результат).

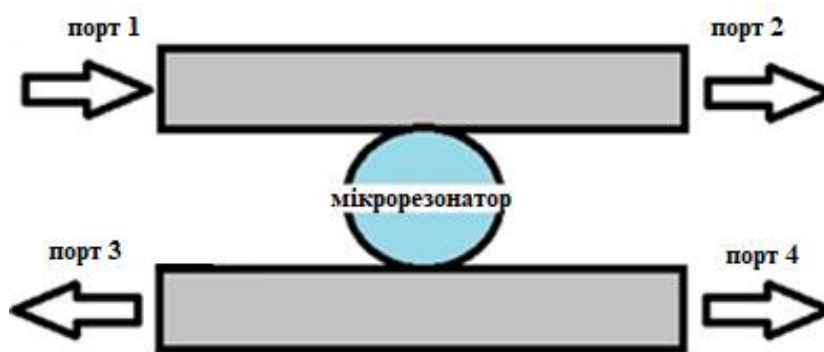


Рисунок 3.1 Спрощена структура однорезонаторного ADF [4]

З рис. 3.1 бачимо, що структура ADF має чотири порти; порти 1 і 2 є вхідними і вихідними терміналами, в той час як порти 3 і 4 є прямими і зворотними терміналами, відповідно.

Для того щоб знайти параметри розсіювання скористаємося S-матрицею розсіювання, яка у нашому випадку буде мати вигляд:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{13} & S_{14} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Елементи матриці будуть визначатися за формулою:

$$S_{1j} = 10 \log[(|T_{1i}|)^2] \quad (3.2)$$

де  $T_{1i}$  – це коефіцієнт передачі для кожного із портів відповідно.

Запишемо формули для розрахунку коефіцієнтів передачі для кожного з портів:

$$T_{11} = \frac{Q}{Q_1} k_{12o} - \frac{Q}{Q_2} k_{12e} \quad (3.3)$$

$$T_{12} = 1 - \frac{Q}{Q_1} k_{12o} - \frac{Q}{Q_2} k_{12e} \quad (3.4)$$

$$T_{13} = -\frac{Q}{Q_1} \sqrt{k_{12o} \cdot k_{34o}} - \frac{Q}{Q_2} \sqrt{k_{12e} \cdot k_{34e}} \quad (3.5)$$

$$T_{14} = \frac{Q}{Q_1} \sqrt{k_{12o} \cdot k_{34o}} - \frac{Q}{Q_2} \sqrt{k_{12e} \cdot k_{34e}} \quad (3.6)$$

де  $Q$ -добротність діелектрика;  $Q_1$  і  $Q_2$  – коефіцієнти ;  $k_{34n}$  та  $k_{12n}$  - коефіцієнти зв'язку мікрорезонатора з лінією передачі 12 і 34 (відповідно) для парних і непарних коливань;  $k_{os}$  – коефіцієнт зв'язку із середовищем;

Коефіцієнти  $Q_1$  і  $Q_2$  будуть визначатися за формулами:

$$Q_1 = \frac{\omega}{\omega_0} + 2iQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - 1 - \frac{\lambda k1}{2} \right) \quad (3.7)$$

$$Q_2 = \frac{\omega}{\omega_0} + 2iQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - 1 - \frac{\lambda k2}{2} \right) \quad (3.8)$$

тут  $\omega$  - частота ( $\omega = 2\pi f$ );  $\omega_0$  - резонансна частота;  $\lambda k1$  і  $\lambda k2$  – це , які будуть визначатися як:

$$\lambda k2 = i(k_{12e} + k_{34e} + k_{os}) \quad (3.9)$$

$$\lambda k1 = i(k_{12o} + k_{34o} + k_{os}) \quad (3.10)$$

### 3.2 Дослідження характеристик розсіювання фільтра

В результаті розрахунків отримаємо залежності параметрів розсіювання від частоти. Для того щоб перевірити вірність, запропонованого у дослідженні, підходу до розрахунку порівняємо його із знайденими вже розрахованими залежностями із [16].

Для цього підберемо максимально схожі коефіцієнти зв'язку. За допомогою програми MathCad змодельюємо однорезонаторний оптичний Add/Drop фільтр на базі мікрокільцевого резонатора Х-форми:

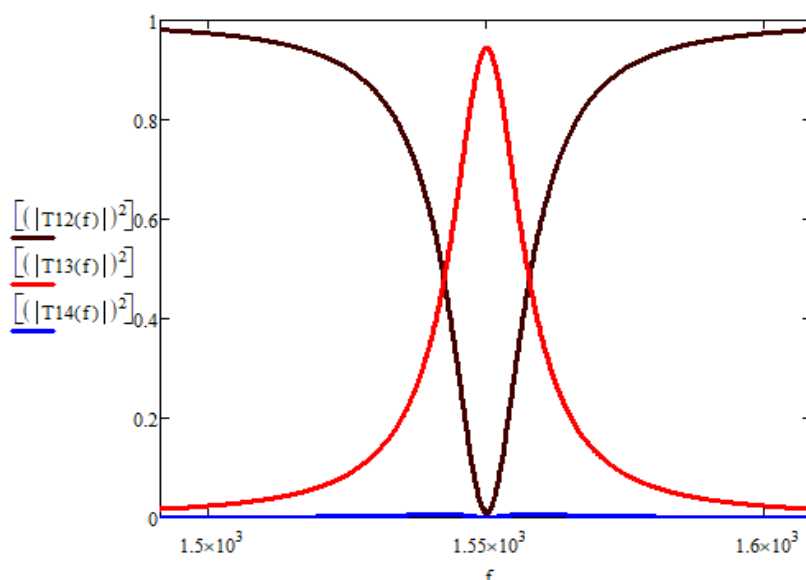


Рисунок 3.2 Графіки залежностей коефіцієнтів передачі отримані після підбору коефіцієнтів зв'язку [4]

$$(k_{12e} = 35 \cdot 10^{-4} ; k_{12o} = 60 \cdot 10^{-4} ; k_{34o} = 57 \cdot 10^{-4} ; k_{34e} = 50 \cdot 10^{-4} ; k_{os} = 0,0002 )$$

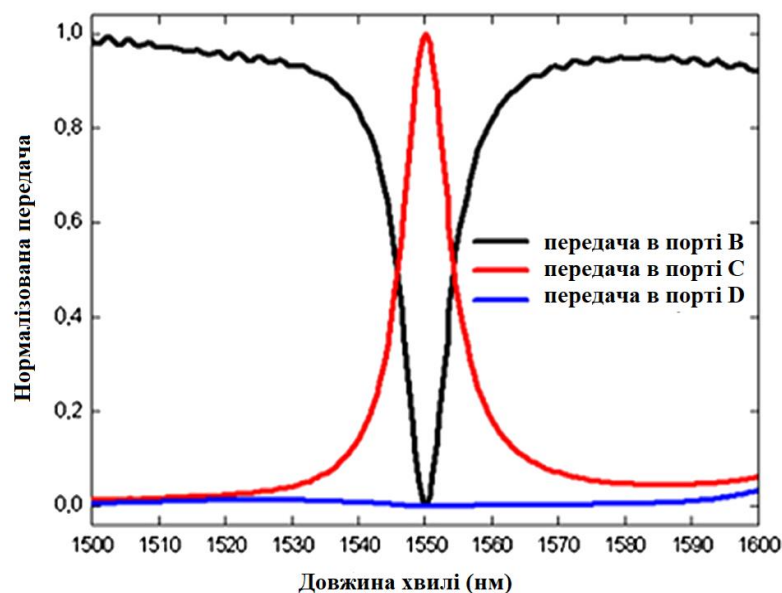


Рисунок 3.3 Графіки залежностей коефіцієнтів передачі, які були обрані для перевірки [16]

### 3.3 Висновки з розділу 3

У даному розділі був запропонований метод розрахунку фільтра на базі одного мікрорезонатора, який є універсальним для будь-якої форми та матеріалу резонатора. Для розрахунку була використана теорія збурень для рівнянь Максвела.

Щоб перевірити коректність запропонованого рішення був спроектований Add/Drop фільтр на основі кільцевого резонатора Х-форми.

Проаналізувавши запропонований метод можемо стверджувати, що за допомогою нього можна спроектувати та дослідити параметри розсіювання фільтрів різних форм та матеріалів, а отримані розрахунки добре узгоджуються з дослідями, які були отримані в лабораторних умовах [16].

Так як фільтри є хорошою базою для побудови мультиплексорів, демультимплексорів та ін., то подібним чином, ми зможемо отримати значення параметрів розсіювання і для них, а в перспективі отримати залежності для більш складних структур.



#### 4. ОПТИЧНІ МУЛЬТИПЛЕКСОРИ НА ОСНОВІ ADD/DROP ФІЛЬТРІВ (OADM)

Для усіх високошвидкісних оптичних мереж потрібні економічні і енергоефективні технології для приладів обробки оптичних сигналів, таких як оптичний add/drop мультимплексор (OADM). Мультимплексування з поділом за довжиною хвилі (WDM) стало привабливою областю досліджень для зменшення площі оптичних з'єднань, а також для забезпечення високошвидкісної передачі даних (рис.4.1).

Оптичний Add/Drop мультимплексор це прилад, який використовується в системах мультимплексування з розділенням по довжині хвилі для мультимплексування і маршрутизації різних каналів світла в одномодове волокно або з нього.

Цей тип оптичного вузла, зазвичай використовується для формування і побудови оптичних телекомунікаційних мереж.

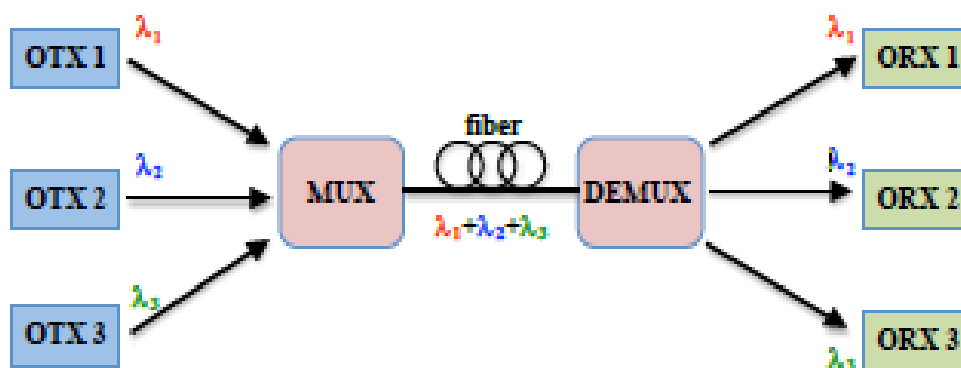


Рисунок 4.1 Приклад три-канальної DWDM системи

«Add» і «Drop» тут відносяться до можливості приладу додавати (add) один або декілька каналів нової довжини хвилі до існуючого багатохвильового WDM-сигналу і/або розгалужувати (drop) один або декілька каналів, передаючи ці сигнали в інший мережевий шлях.

Традиційно такі мультимплексори складаються з: оптичного демультимплексора, оптичного мультимплексора і між ними метода

переконфігурації трактів між демультимплексором, мультимплексором і набором портів для додавання і розгалуження (Adding/Dropping) сигналів.

Демультимплексор розділяє довжини хвиль у вхідному волокні на порти. Переконфігурація може бути досягнена за допомогою оптоволоконної комутаційної панелі або оптичних перемикачів, які направляють довжини хвиль в мультимплексор або в drop порти.

Мультимплексор мультимплексує канали довжин хвиль, які повинні продовжуватися з портів демультимплексора з тими які надходять з add портів, на одне вихідне волокно.

Існує безліч технологій для створення демультимплексора і мультимплексора, включаючи фільтри, волокно-оптичні брегівські решітки з оптичними циркуляторами, прилади з решіткою у вільному просторі і вбудовані пласкі хвилеводні решітки.

#### 4.1 Схематичне функціональне представлення OADM

Будь-яка абонентська петлева архітектура для широкосмугових додатків повинна мати певні бажані властивості. Обладнання контролю доступу в абонентських приміщеннях повинне бути дешевим і простим в обслуговуванні. Устаткування високої вартості має бути в центральному офісі. Це знижує вартість одного абонента для мережі [19].

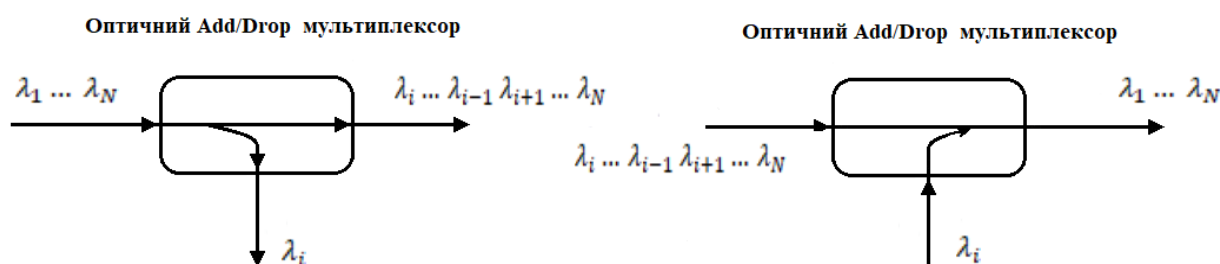


Рисунок 4.2 (а) Схема Drop функціонування (б) Схема Add функціонування

[19]

Оптичний Add/Drop мультиплексор може бути виготовлений з використанням акустичного або інтерферометричного ефекта.

В мультиплексорі є три порти: вхідний порт, add/drop і вихідний порт. Припускаючи, що є  $\lambda_i \dots \lambda_{n-1}, \lambda_n$ , довжина хвилі  $\lambda_n$  на вході і  $\lambda_i$  розчіплюється, потім в add/drop порті відгалужується. У вихідному порті усі інші довжини хвиль  $\lambda_1 \dots \lambda_{i-1} \lambda_{i+1} \dots \lambda_{n-1} \lambda_n$  будуть такими ж, як на рис.4.2 (а). Коли довжина хвилі  $\lambda_i$  додається, тоді на вхідному порті  $\lambda_i$  не повинно бути. На вихідному порті всі довжини хвиль ( $\lambda_1 \dots \lambda_{n-1} \lambda_n$ ) будуть такими як на рис.4.2(б) [19].

## 4.2 Типи OADM

OADM класифікуються як FOADM (Fixed Optical Add-Drop Multiplexe) і ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer ). В OADM з фіксованою довжиною хвилі довжина хвилі була вибрана і залишається незмінною, поки втручання людини не змінить її.

В ROADM довжини хвиль між оптичним демультиплексором/мультиплексором можуть динамічно направлятися від виходів демультиплексора на будь-який із входів мультиплексора. [20]

### 4.2.1 FOADM

Спочатку FOADMs були розроблені для поліпшення доставки «експрес» трафіку через мережі, які не вимагають дорогої регенерації ОЕО (optical-electrical-optical) . FOADM використовують фіксовані фільтри, які add/drop вибрану «смугу» довжини хвилі і передають інші довжини хвиль через вузол.

Технологія статичної фільтрації довжин хвиль зменшує вартість і ослаблення для демультиплексування всіх DWDM сигналів в сигнальному тракті. Рішення називається FOADM тому що довжина хвилі(-ль), що додаються і

розчіплюються фіксуються під час встановлення add/drop фільтра на оптичному шляху через вузол. Додаткові фільтри не можна додати без переривання довжин хвиль, що передаються через вузол [20].

#### 4.2.2 ROADM

ROADMs були розроблені для забезпечення гнучкості в переправленні оптичних потоків, минаючи помилкові з'єднання, дозволяючи мінімально порушувати послуги та можливість адаптувати або модернізувати оптичну мережу до різних технологій WDM.

Він використовує селективний перемикач довжини хвилі (WSS). WSS має 8-мірне перехресне підключення та мережеве з'єднання WDM. Схема ROADM також дозволяє вводити або виводити одну довжину хвилі або групу довжин хвиль через фіксований порт.

У системах ROADM нам не потрібно перетворювати оптичні сигнали на електричні сигнали і прокладати ці сигнали за допомогою звичайних електронних перемикачів, а потім знову перетворюватися на оптичні сигнали, як і FOADM. ROADM може налаштовуватись за потребою без впливу на трафік.

На рис.4.3 наведений принцип роботи ROADM [20].

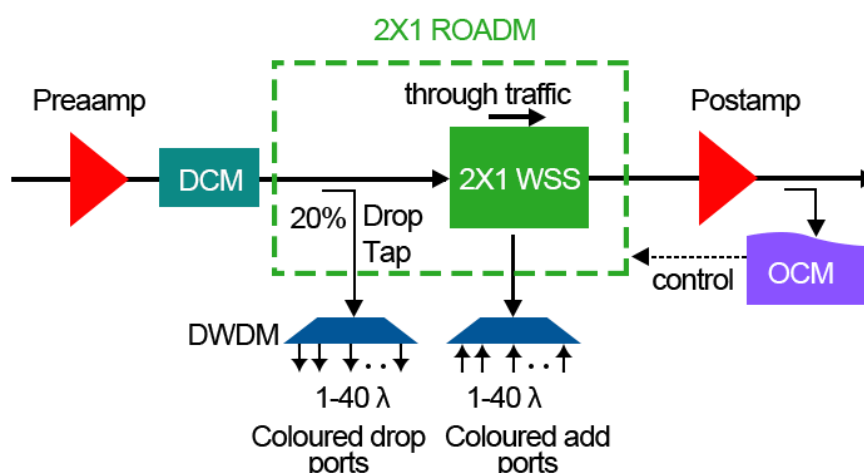


Рисунок 4.3 Схематичне зображення принципу роботи ROAD [20]

### 4.3 OADM на основі кільцевого резонатора

Коли оптоволоконні мережі з'являються в будинку кінцевого користувача, доступність недорогих оптичних компонентів стає все більш актуальною, так як вартість цих приладів може бути розділена лише невеликою кількістю користувачів. Окрім того масштабовані компоненти, які можна конфігурувати, будуть знаходити все більш широке застосування в магістральних мережах, так як вимоги до полоси пропускання повинні розподілятися динамічно, щоб у повній мірі використовувати полосу пропускання базових мереж. Ці компоненти також повинні підтримувати багатоадресну передачу або широкомовну передачу каналів певної довжини хвилі більш ніж одному кінцевому користувачеві.

Оптично інтегровані компоненти, які базуються на щільно інтегрованих структурах мікро-кільцевого резонатора, здатні задовольняти вищенаведені вимоги.

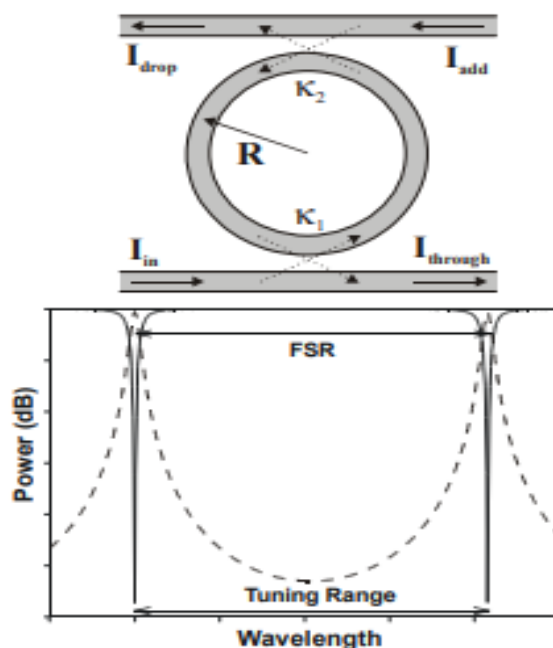


Рисунок 4.5 Схематичне зображення і змодельований відгук одиночного мікрокольцевого резонатора через наскрізний порт  $I_{\text{through}}$  (цільна лінія) і drop порт  $I_{\text{drop}}$  (пунктирна лінія) [21]

На рис.4.5 схематичне зображення МР дано разом з довжиною хвилі, що моделюється, на вихідних портах. Коли для певної довжини хвилі світло всередині кільця знаходиться в резонансній потужності, то воно падає в drop порт і зменшується на наскрізному порті. Резонанси виникають періодично на відстані, яка називається вільним спектральним діапазоном (FSR).

Резонансна довжина хвилі може бути налаштована, наприклад, за допомогою методів термічної настройки. Таким чином, певна довжина хвилі може бути переключена до drop порту або до наскрізного порту. Щоб мати можливість звернутися до будь-якої довжини хвилі важливо щоб діапазон настройки перевищував FSR. В основному МР діє як компактний просторово-селективний хвильовий перемикач, який можна переналаштовувати [21].

#### 4.3.1 Восьми-канальний ROADM на основі кільцевого резонатора

Кільцеві резонатори каскадно створюють всі оптичні мультиплексори і демультиплексори для систем DWDM. Мікрорезонатори вищого порядку використовуються для мінімізації перехресних втрат в OADM. Проектна реалізація 8-канального OADM описується у дослідженні [22].

Блок-схема 8-канального мікропроцесорного резонатора показана на рис.4.6, кожен складається з двох шинних хвилеводів, які зв'язані кільцевим хвилеводом. Цей прилад з чотирма портами, для демультиплексора використовує вхідний, наскрізний, drop порти, а для мультиплексора – вхідний, наскрізний і add порти.

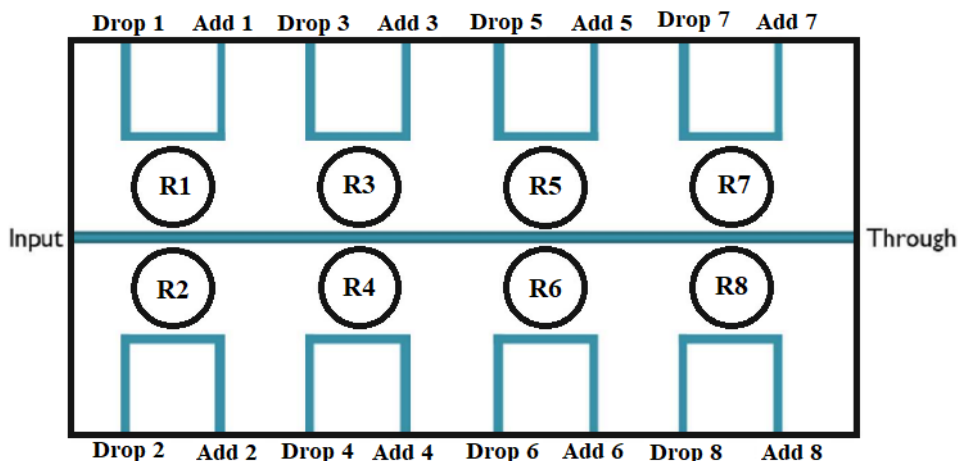


Рисунок 4.6 Структурна схема 8-канального OADM [22]

Розчіплююча оптична потужність  $P_{drop}$  розраховується як проміжне значення вхідної потужності  $P_{in}$  і коефіцієнтів зв'язку  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ , використовуючи формулу (4.1):

$$P_{drop} = P_{in} \frac{|t_{12}|^4}{|1 - t_{11}^2 e^{j\beta L}|^2} \quad (4.1)$$

де  $L$  – ефективна довжина кільцевого хвильоводу і  $\beta$  фазова постійна вздовж кільцевого хвильоводу. При резонансі різниця фаз після проходження сигналу туди і назад кратна  $2\pi$ . Дані основного потоку у вигляді оптичного сигналу надходять з вхідного порту до наскрізного і, коли вони використовуються в якості демультиплексора, окремі дані каналу приймаються через drop порт.

В конфігурації мультиплексора add порт використовується для мультиплексування каналів для формування оптичного сигналу основного потоку DWDM. Коефіцієнт заломлення достатньо високий, тому втрати при згині і втрати при розповсюдженні незначні [22].

Кожне мікротрітце розроблене з використанням ніобата літія в якості підкладки, а потім тонкого шару  $\text{SiO}_2$ , на якому OADM розроблений з використанням хвильоводу з ніобатним каналом літія. Ширина хвильоводу 700нм, а висота 350нм. Розділення між шинним хвильоводом і кільцевим складає 100нм. Показники заломлення LN і  $\text{SiO}_2$  взяті з розмірами 1.55мкм.

Основна мода обмежена в хвилеводі. Режим обмежений, а це означає. Що оптичний сигнал розповсюджується через серцевину хвилеводу і сигнал витоку менший. Поляризація TE використовується при моделюванні.

Крива пропускання спостерігається у отворі кожного кільця і зображена на рис.4.7. Спостерігається, що втрати, які вносяться в drop порт складають максимум 1,2дБ при використанні в якості демультиплексора, де добротність  $Q=1636$ . Швидкість передачі даних складає 10Гбіт/с. Взаємні завади також мінімальні і в резонансному стані оптична потужність на інших портах рівна нулю [22].

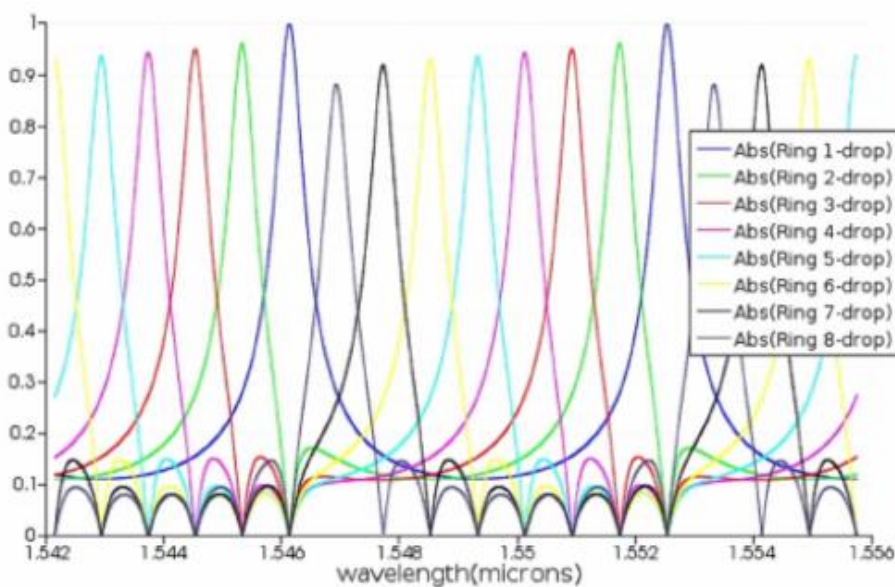


Рисунок 4.7 Ділянка передачі в drop порті у кожного кільця [22]

Графік передачі через наскрізний порт 8-канального OADM як демультиплексора, коли чотири канали відгалуженні і через наскрізний порт 8-канального OADM як мультиплексор при повторному додаванні 4 каналів показано на рис.4.8.



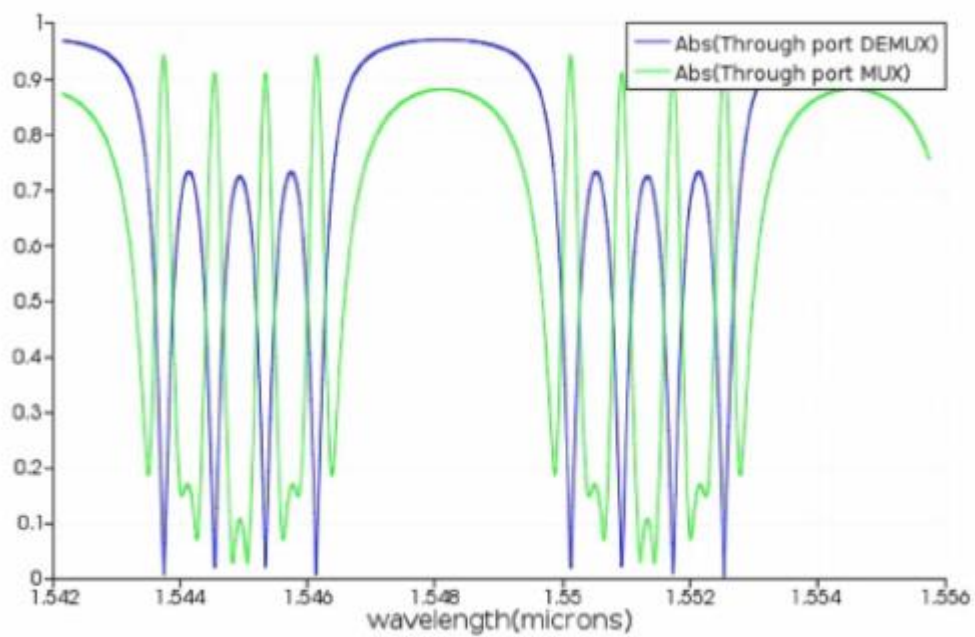


Рисунок 4.8 Ділянка передачі через порт демультиплексора і мультиплексора [22]

## ВИСНОВКИ

Сьогодні у всьому світі інтенсивно розвиваються широкополосні та високошвидкісні цифрові волоконно-оптичні системи передачі.

За останнє десятиліття інтерес до надпровідного мікрорезонатора різко зріс. Характеристики резонатора значно покращилися завдяки використанню поліпшених геометрій і матеріалів, а також кращому розумінню основоположень фізики. Зв'язок затухаючих хвиль між двома хвилеводами і резонаторами різної форми є основною ідеєю ефективної конструкції адитивних фільтрів для мультиплексування з розділенням по довжині хвилі (WDM). Такі прилади були реалізовані за допомогою діелектричних хвилеводів, де обмеження світла відбувається за допомогою повного внутрішнього відбиття.

Add/Drop фільтри є основою для Add/Drop мультиплексорів та демультимплексорів, впровадження їх в оптичні мережі дозволяє вводити, видаляти, і, найголовніше обходити трафік. Окрім того OADM можуть підтримувати такі функції як захист, розгалуження/продовження, повернення по шлейфу і повторне використання довжини хвилі.

У дипломній роботі був представлений універсальний метод розрахунку оптичних Add/Drop фільтрів на базі мікрорезонаторів шепочучої галереї різних форм та матеріалів, також було експериментально перевірено його коректність, завдяки створенню моделі фільтра в програмному забезпеченні MathCad.

За допомогою моделі шляхом підбору необхідних коефіцієнтів зв'язку вдалося відтворити параметри розсіювання Add/Drop фільтра X-форми, характеристики якого були представлені в [16].

Завдяки такому, але вже удосконаленому, методу в майбутньому можна буде розраховувати не тільки одно-резонаторні фільтри, а вже й більш складні структури, такі як багато-резонаторні фільтри, демультимплексори та мультиплексори.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Н. Г. Павлов, «Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов,» Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 2018.
- 1] M. Gomilsek, "Whispering gallery modes," University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Physics, Ljubljana, 2011.
- 2] G. S. Murugan, M. N. Petrovich, Y. Jung, J. S. Wilkinson and M. N. Zervas, "Hollow-bottle optical microresonators," *Optics Express*, 2011.
- 3] A. С. Квітка та О. О. Трубін, «Дослідження параметрів розсіювання Add/Drop (ADF) фільтра на оптичних микрорезонаторах,» Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019.
- 4] J. Wu, X. Xu and T. Nguyen, "RF Photonics: An Optical Microcombs` Perspective," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronacs*, July/August 2018.
- 5] А. И. Сидоров, Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники, Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014, p. 148.
- 6] L. Hee, "Whispering Gallery Mode Microresonators for Lasing and Single Nanoparticle Detection," Washington University in St. Louis, 2012.
- 7] М. Городецкий, Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью, Москва: Москва Физмалит, 2011, p. 415.
- 8] A. Chiasera, Y. Dumeige, P. Feron, M. Ferrari, Y. Jestin, G. Nunzi, C. Stefano Pelli, S. Soria and G. C. Righini, "Spherical whispering-gallery-mode microresonators," *Wiley Interscience*, p. 26, 14 July 2009.
- 9] J. Xuefeng, J. Q. Abraham, . S. . H. Huang and Y. Lan , "Whispering gallery microsensors: a review," Department of Electrical and System Engineering,
- 10]

Washington University in St. Louis,, St. Louis, Missouri, USA.

J. S. Wilkinson, M. N. Zervas and S. G. Murugan, "Selective excitation of  
11] whispering gallery modes," *Optics Express*, 30 Jun 2009.

А. Б. Андросик, С. А. Воробьев и С. Д. Мировицкая, «Инновации в  
12] науке: сб. ст. по матер. V междунар. науч.-практ. конф. Часть I.,» в  
*Моделирование резонансных интегральных устройств*, Новосибирск, 2011.

A. Rajib, A. A. Rifat, A. . K. Yetisen, M. S. Salem, S.-H. Yun and H. Butt,  
13] "Optical microring resonator based corrosion sensing," *The Royal Society of  
Chemistry*, May 2016.

«Optical ring resonators,» Wikipedia, 20 лютий 2019. [Онлайновий].  
14] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_ring\\_resonators](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_ring_resonators). [Дата  
звернення: квітень 2019].

F. Monifi, . S. K. Ozdemi та . L. Yang, «Tunable add-drop filter using an  
15] active whispering gallery mode microcavity,» *Physics optics*, 30 August 2013.

S. Robinson and R. Nakkeeran , "Photonic crystal ring resonator-based add  
16] drop filters: a review," *Optical Engineering*, 12 June 2013.

Z. Zhong-Hao, . C. Yuan, S. Zhen, Z. Chang-Ling , G. Guang-Can and D.  
17] Chun-Hua , "Tunable Add-Drop Filter With Hollow Bottlelike Microresonators,"  
*IEEE Photonics Journal*, p. 8, April 2018.

F. Tan, "Inegrated optical filters based on microring resonators," te Bandung,  
18] Indonesië, 2004.

M. A. Abd El-Naser, A. Nabih Zaki Rashed and M. M. A. Eid, "Important  
19] Role of Optical Add Drop Multiplexers (OADMs) With Different Multiplexing  
Techniques in Optical Commu," *International Journal of Advanced Engineering &  
Applications*, Jan 2010.

«OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) Tutorial,» FiberStore Co.,  
20] Limited, 02 11 2015. [Онлайновий]. Available: <https://www.fs.com/oadm-optical-add-drop-multiplexer-tutorial-aid-451.html>. [Дата звернення: квітень 2019].

D. Geuzebroek, . E. Klein, . H. Kelderman, . C. Bornholdt та A. Driessen,  
 21] «40 Gbit/s Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer,» Berlin, Germany,  
 Enschede, the Netherlands. .

H. Kumar, V. Janyani, O. Buryy, S. Ubizskii, D. Sugak and G. Singh,  
 22] "International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering," in  
*Eight-Channel Optical Add Drop Multiplexer Based on RingResonator Using*  
*LNOI Channel Waveguides*, Lviv, 2017.